

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE
TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES



GRADO EN INGENIERÍA
DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

DISEÑO DE ANTENAS RECONFIGURABLES
BASADAS EN EL USO DE ELASTÓMEROS

AUTORA: LAURA MORENO BELMONTE
TUTORA: DRA. EVA RAJO IGLESIAS
COTUTOR: DR. ÓSCAR QUEVEDO TERUEL

7 de Julio de 2015

TÍTULO: *DISEÑO DE ANTENAS RECONFIGURABLES BASADAS
 EN EL USO DE ELASTÓMEROS.*

AUTORA: *LAURA MORENO BELMONTE*

TUTORA: *DRA. EVA RAJO IGLESIAS*

COTUTOR: *DR. ÓSCAR QUEVEDO TERUEL*

La defensa del presente Trabajo de Fin de Grado se realizó el día 7 de Julio de 2015 siendo calificada por el siguiente tribunal:

PRESIDENTE: *DRA. CARMEN PELÁEZ MORENO*

SECRETARIO *DRA. RAQUEL CRESPO GARCÍA*

VOCAL *DRA. MARTA GIL BARBA*

Habiendo obtenido la siguiente calificación:

CALIFICACIÓN:

Presidente

Secretario

Vocal

*A mis padres,
porque sin ellos no lo habría logrado.*

*A mi abuela Rosario, que ha sido como una madre para mí;
y a mi abuelo Manolo, porque daría lo que fuera porque estuviera aquí hoy.*

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi tutora Eva Rajo Iglesias, por darme la oportunidad de realizar este Trabajo de Fin de Grado y por toda su dedicación y empeño a lo largo de estos meses.

A mis padres, *Eloy* y *Rosa*, que me han enseñado que todo esfuerzo tiene su recompensa. Sin su ayuda no lo habría conseguido.

A mis amigos y a mis compañeros de clase en especial:

A *Cristina*, por haber compartido con ella estos 25 años de amistad (con nuestros más y nuestros menos) y por ser mi eterna compañera de mesa en el “Farne”.

A *Alberto*, por su energía positiva inagotable y por los buenos ratos que hemos pasado en el Campus con café en mano.

Por último, a mi novio Pietro, porque ha sido un grandísimo apoyo en estos últimos dos años, pero sobre todo, por creer en mí.

A todos vosotros, **GRACIAS**.

Índice general

Lista de Figuras	X
Lista de Tablas	XII
Lista de Acrónimos	XIII
ABSTRACT	XV
1. ESTADO DEL ARTE	1
1.1. ANTENAS DE PARCHE	1
1.1.1. Características generales	1
1.1.2. Métodos de alimentación	6
1.1.3. Modelos de análisis	8
1.1.4. Parche rectangular	9
1.2. POLÍMEROS ELECTROACTIVOS	13
1.2.1. Introducción	13
1.2.2. Elastómeros Dieléctricos	14
1.2.3. Principio de operación	14
1.2.4. Aplicaciones	16
2. DISEÑO DEL PARCHE	17
2.1. PRESENTACIÓN DE LOS MATERIALES	17
2.2. ESTRUCTURA DEL PARCHE	18
2.2.1. Introducción: parámetros y bloques de la antena	18
2.2.2. Creación de la antena	19
2.2.3. Inserción de los puertos	21

2.3. SIMULACIÓN	27
2.3.1. Permitividad $\epsilon_r = 2,2$	27
2.3.2. Permitividad $\epsilon_r = 3,38$	33
2.4. DIAGRAMA DE RADIACIÓN	37
2.5. CONCLUSIONES	40
3. DEFORMADO DEL PARCHE	43
3.1. PRESENTACIÓN DE LOS MATERIALES	43
3.2. RESULTADOS	44
3.3. CONCLUSIONES	46
4. DOBLE ANTENA DE PARCHE	49
4.1. INSERCIÓN DE UNA CAPA METÁLICA ADICIONAL	49
4.2. SIMULACIÓN	50
4.3. DIAGRAMA DE RADIACIÓN	51
4.4. CONCLUSIONES	52
5. FABRICADO DEL PARCHE	53
5.1. PLANTEAMIENTO	53
5.2. MODELOS FABRICADOS	56
5.3. MEDIDAS EXPERIMENTALES	58
5.4. CONCLUSIONES	59
6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	61
6.1. CONCLUSIONES	61
6.2. LÍNEAS FUTURAS	63
SUMMARY	65
Bibliografía	72
Apéndices	73
A. CST Studio Suite	75
B. Presupuesto	77
C. Bandas de frecuencia	79

Lista de Figuras

1.1. Antena microstrip: vista en perspectiva (a) y de perfil (b)	2
1.2. Formas más comunes de parches microstrip	4
1.3. Representación típica del coeficiente de reflexión de una antena	5
1.4. Alimentación de un parche con línea microstrip	6
1.5. Alimentación de un parche con sonda coaxial	7
1.6. Alimentación de un parche mediante acoplo por ranura	7
1.7. Alimentación de un parche mediante acoplo electromagnético	8
1.8. Línea microstrip (a) y constante dieléctrica efectiva (b)	9
1.9. Longitud efectiva de una antena de parche debido a los efectos de borde	10
1.10. Parche microstrip rectangular como modelo de cavidad resonante	11
1.11. Principio de funcionamiento de los elastómeros dieléctricos	15
2.1. Creación de nuevos bloques en CST Studio Suite	20
2.2. Vista de la sección de la antena de parche	21
2.3. Vista en perspectiva de la antena de parche	21
2.4. Creación de un puerto discreto en <i>CST</i>	22
2.5. Situación del puerto discreto en la antena	23
2.6. Cálculo de parámetros de una línea microstrip	24
2.7. Situación de la línea microstrip en la antena	25
2.8. Configuración del puerto de guía de onda en la antena	25
2.9. Puerto de guía de onda en la antena: perspectiva	26
2.10. Puerto de guía de onda en la antena: perfil	26
2.11. Sustrato 1: $W = 20,21 \text{ mm}$	28
2.12. Sustrato 1: $W = 18,5 \text{ mm}$	28
2.13. Asistente de configuración de barrido de parámetros	29

2.14. Barrido: inserción de un nuevo parámetro	29
2.15. Barrido: resultado de la simulación	30
2.16. Sustrato 1: optimizado del puerto discreto, <i>posicion</i> = 3,2 mm	30
2.17. Sustrato 1: Evolución del parámetro S_{11}	31
2.18. Sustrato 1: línea microstrip y puerto guíaonda	32
2.19. Sustrato 1: línea microstrip y puerto guíaonda. Solución óptima	32
2.20. Sustrato 2: línea microstrip y puerto guíaonda	33
2.21. Sustrato 3: Evolución del parámetro S_{11}	34
2.22. Sustrato 3: línea microstrip y puerto guíaonda	34
2.23. Sustrato 3: línea microstrip y puerto guíaonda. Solución óptima	35
2.24. Sustrato 4: línea microstrip y puerto guíaonda	36
2.25. Diagrama de radiación: nuevo ‘field monitor’	37
2.26. Conclusiones: Respuesta en frecuencia de todos los parches (Gráfica)	41
3.1. Sustrato 1: Variabilidad en frecuencia	45
3.2. Sustrato 3: Variabilidad en frecuencia	45
4.1. Antena de doble parche microstrip	49
4.2. Sustrato 1: Respuesta en frecuencia de antena de doble parche	50
4.3. Sustrato 3: Respuesta en frecuencia de la antena de doble parche	50
5.1. Foto del elastómero	55
5.2. Fabricado de la antena: parte inferior	56
5.3. Fabricado: Analizador de redes para medición del parámetro S_{11}	58
5.4. Fabricado: Respuesta en frecuencia S_{11} para los prototipos fabricados	59

Lista de Tablas

2.1.	Sustratos dieléctricos disponibles	17
2.2.	Parámetros introducidos en CST Studio Suite	19
2.3.	Dimensiones de los bloques de la antena de parche	20
2.4.	Coordenadas del puerto discreto	22
2.5.	Dimensiones de la línea microstrip	24
2.6.	Sustrato 1: Diagramas de radiación	38
2.7.	Sustrato 2: Diagramas de radiación	38
2.8.	Sustrato 3: Diagramas de radiación	39
2.9.	Sustrato 4: Diagramas de radiación	39
2.10.	Conclusiones: Respuesta en frecuencia de todos los parches (Valores numéricos) .	41
3.1.	Sustratos dieléctricos para deformado del parche	44
3.2.	Deformado del parche: variabilidad de parámetros	44
3.3.	Deformado del parche: variabilidad de la frecuencia	47
4.1.	Doble parche, sustrato 1: Diagramas de radiación en coordenadas polares	51
4.2.	Doble parche, sustrato 3: Diagramas de radiación en coordenadas polares	51
5.1.	Fabricado: datos parte inferior	54
5.2.	Fabricado: datos parte superior	54
5.3.	Medidas de fabricado de las partes superiores del parche	56
5.4.	Fabricado: las 5 partes superiores	57
1.	Apéndice A: Diferentes módulos de la herramienta <i>CST Studio Suite</i>	75
2.	Apéndice B: Desglose en horas del TFG	77
3.	Apéndice B: Presupuesto total del TFG	78

4.	Apéndice C: Bandas de radiofrecuencias UIT	79
----	--	----

Lista de Acrónimos

3G Third Generation

4G Fourth Generation

CST Computer Simulation Technology

EAP Electroactive Polymer

EHF Extremely High Frequency

EM Electromagnetic

FSS Frequency Selective Surface

GPS Global Positioning System

HF High Frequency

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

LF Low Frequency

MF Medium Frequency

MMIC Monolithic Microwave Integrated Circuits

PEC Perfect Electrical Conductor

RF Radio Frequency

RFID Radio Frequency Identification

RF-MEMS Radio Frequency Microelectromechanical Systems

SHF Super High Frequency

SMA SubMiniature version A

TFG Trabajo de Fin de Grado

TM Transversal Magnético

UHF Ultra High Frequency

UIT Unión Internacional de Telecomunicaciones

VHF Very High Frequency

VLF Very Low Frequency

WiMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access

ABSTRACT

Introduction

Mobile communications have become so important that wireless communications have approached even more to our daily lives. In the previous years, several improvements on printed circuits and an increasement in the multi-functionality of mobile devices have taken place, and thus, 3G/4G, wireless networks, Bluetooth or Digital Television have been included in these devices.

Since each of these communications formats works at a different frequency, an antenna installation for every wavelength turns necessary, unless a multiple frequency adaptative antenna can be installed on these devices.

Multiple frequency manufacturing methods require integrated elements inside the antenna itself, so that it can radiate at different wavelengths. The aim is to use an antenna that can reshape itself, consequently obtaining a valid frequency bandwidth where the antenna can operate correctly.

The simplest choice is to change the antenna dimmensions, which means resize the device where the antenna is installed depending on the application and the needed frequency. This method may present several problems when light, small and variable frequency antennas are used.

A potential way to solve this problem is to create reconfigurable antennas through artificial muscles instead of actuators. Thereby, an antenna reshape and resize becomes possible. Moreover, if this structure is implemented onto polymers, a reconfigurable antenna installation in mobile devices is also possible.

Purpose of this Bachelor Thesis

This Bachelor Thesis takes the advantage of the big need previously mentioned, and makes use of materials known as *dielectric elastomers*, that change their size and shape because of the applied voltage on them.

Firstly, the behaviour of this material will be tested in a fixed-size antenna, using the software *CST Studio Suite*. In this case, the antenna will work at a unique frequency (5 *GHz*) and all the steps (antenna creation, ports insertion and antenna frequency response) will be explained.

Four type of substrates are considered in these simulations according to the ones available in our lab, and all of them will be evaluated for this particular design. Radiation patterns will be shown in polar coordinates, according to the two main planes $\phi = 0^\circ$ and $\phi = 90^\circ$.

Coming up next, dielectric elastomer behaviour will be analyzed through two different simulations. Two substrates will be chosen (from the initial four) to proceed with simulations, and antenna size, operating frequency and elastomer thickness will be given both in numerical and graphic ways.

After that, another simple simulation is done. It consists of an antenna (similar to that one in previous chapters) with a double-layer microstrip patch that sandwiches the dielectric elastomer layer. This is a more realistic solution because of the way in which the elastomer must be manufactured and frequency theoretical response is shown as well. Radiation pattern in polar coordinates is also shown.

Finally, the real purpose of this Bachelor Thesis is presented: *the antenna manufacturing*. Several measures have been collected and confronted with the theoretical ones, letting the student to get tangible conclusions. Unfortunately for this step we have no chance for evaluation of a real elastomer, but its effect is taken into account by manufacturing several prototypes.

Document Tree

This Bachelor Thesis is structured in 6 Chapters, each of which is explained in the following lines:

- ★ **Chapter 1:** called itself “*Estado del Arte*” is the one that is responsible for giving a general view of, on the one hand, patch antennas (how they work, how they are fed and how they are designed), and on the other hand, electroactive polymers and their behaviour (reshaping, basically).
- ★ **Chapter 2:** firsts simulations are shown in this chapter. Four different substrates are available and simulations results are shown for all of them. Discrete and waveguide ports insertion are explained, as well as parameter optimization in order to get the best frequency response.
- ★ **Chapter 3:** antenna reshape and frequency variability are shown in this chapter. Only two substrates have been selected, and results for each of them are illustrated in these pages.
- ★ **Chapter 4:** a more realistic simulation is presented in this chapter. Two layers of microstrip patch are installed in the antenna and frequency response are included. Dielectric elastomer is sandwiched by both patches. Same substrates as in previous chapter have been chosen.
- ★ **Chapter 5:** the antenna manufacturing and measuring is presented in this chapter. Just one substrate has been involved in this process.
- ★ **Chapter 6:** some general conclusions are presented in this chapter and several future lines are suggested.

Capítulo 1

ESTADO DEL ARTE

1.1. ANTENAS DE PARCHE

Las antenas de parche [1] también son conocidas como antenas microstrip, ya que se basan en dicha tecnología, y son además una extensión de la línea de transmisión microstrip. La primera antena microstrip data del 1950, pero no fue hasta 20 años más tarde, 1970, cuando se empezaron a fabricar las primeras.

La tecnología microstrip es una evolución de la stripline, y aunque las primeras antenas de parche fueron construidas en esta última tecnología, evolucionaron poco a poco hacia la microstrip, siendo éste el modo en que se fabrica hoy en día.

1.1.1. Características generales

Una antena microstrip consiste en una tira metálica muy delgada (denominada *parche*) situada sobre una lámina dieléctrica que a su vez reposa sobre un plano de masa. El parche es de un espesor mucho menor que la longitud de onda en el vacío, λ_0 (típicamente, del orden de micras). Normalmente este espesor es el de la metalización con la cual vienen impregnados los sustratos comerciales. La lámina dieléctrica suele tener un espesor $0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,05\lambda_0$.

Generalmente el parche está diseñado para que su dirección de máxima radiación sea la normal al plano que lo contiene (dirección *broadside*) aunque también pueden configurarse para una radiación *end-fire* (dirección longitudinal del plano que contiene la antena).

El parche y el plano de masa se encuentran separados por una lámina dieléctrica (denominada *sustrato*), como se observa en la Figura 1.1.

Existen multitud de sustratos que pueden ser usados para el diseño de antenas microstrip, con constantes dieléctricas y espesores que dependerán de la aplicación para la que éstas hayan sido destinadas. El valor de ϵ_r suele estar comprendido entre $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$, y conduce a la siguiente diferenciación:

- Los sustratos con *permitividad baja* y espesor medio (siempre muy inferior a la longitud de onda) proporcionan una mejor eficiencia y un mayor ancho de banda, aunque las dimensiones de la antena son mayores.
- Por el contrario, los sustratos con una *permitividad alta* son los ideales para circuitos de microondas, ya que requieren campos fuertemente unidos para minimizar posibles acoplos y radiaciones indeseadas, y resultan en antenas de tamaño más reducido. Sin embargo las pérdidas son mayores, su eficiencia menor, y su ancho de banda más estrecho [1].

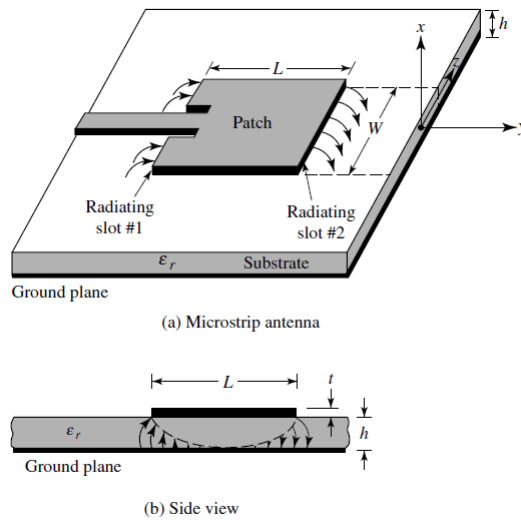


Figura 1.1: Antena microstrip: vista en perspectiva (a) y de perfil (b)

Los parches en las antenas microstrip pueden tomar diversas formas, además de las canónicas ya conocidas. La Figura 1.2 recoge algunas de ellas. La *rectangular*, *cuadrangular*, *circular* o el *dipolo* son las más usadas debido a su facilidad de análisis y fabricación y a sus características de radiación. Sea cual sea la forma del parche, la frecuencia de operación queda definida por alguna dimensión de su geometría.

Las antenas de parche poseen ciertas ventajas que las hacen atractivas en multitud de operaciones, aunque también existen algunos inconvenientes [1].

■ **Ventajas:**

- Poseen bajo perfil, es decir, son de tamaño y espesor reducidos.
- Son ligeras y de fácil instalación.
- Dado que son antenas resonantes, en general poseen buena eficiencia.
- Pueden utilizarse tanto en superficies planas como no planas.
- Su fabricación es un proceso económico y sencillo, particularmente en circuitos basados en tecnología impresa.
- Sus diseños son compatibles con circuitos integrados de microondas (MMIC).
- Son versátiles en frecuencia de resonancia, polarización (tanto lineal como circular), diagrama de radiación e impedancia.

■ **Inconvenientes**

- Sólo pueden manejar valores bajos de potencia.
- Ofrecen una banda de operación estrecha.
- Presentan radiación espuria debida a los efectos de borde y excitan ondas de superficie, y por ello su rendimiento en aplicaciones de escaneo o barridos electrónicos es bajo.

Es importante tener presente que el rango de frecuencias usado para aplicaciones con parches es bastante amplio, desde 1 hasta varias decenas de GHz , siempre con una banda estrecha, y por tanto manejan un nivel de potencia reducido.

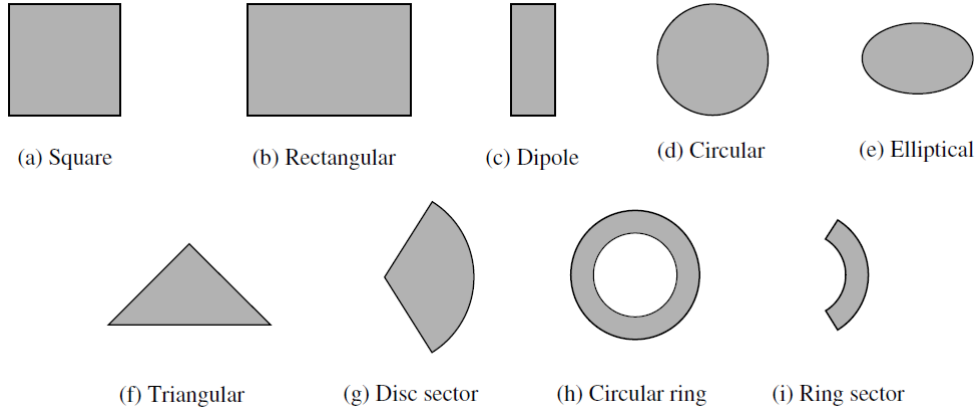


Figura 1.2: Formas más comunes de parches microstrip

Parámetro S_{11}

Durante el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se mostrarán las respuestas en frecuencia de diversas antenas de parche. Esta respuesta reflejará el comportamiento del parámetro de Scattering S_{11} (o Γ), es decir, el coeficiente de reflexión a la entrada del sistema (ver Ecuación (1.1), representada unidades naturales). Es uno de los parámetros que más información da acerca del comportamiento de una antena, y es igual a la relación de la potencia de las ondas reflejada e incidente [2]:

$$S_{11} = \Gamma = \frac{V_1^-}{V_1^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1.1)$$

Donde Z_0 es la impedancia de referencia (50Ω) y Z_L es la impedancia de carga, es decir, la impedancia de entrada de la antena.

La Figura 1.3 muestra una representación gráfica dentro de este TFG. En él, el parámetro S_{11} experimenta una caída abrupta en torno a los $5 GHz$, que será la frecuencia de resonancia de la antena (y por tanto radiará en esta frecuencia). Por otro lado, en las frecuencias para las que se tienen valores cercanos a $0 dB$ la antena no radiará, pues toda la potencia incidente se verá reflejada.

Habitualmente se considera un buen nivel de adaptación (es decir, baja reflexión) cuando el parámetro S_{11} está por debajo de los $-10 dB$. Con este valor se podrá determinar la anchura de banda de la antena.

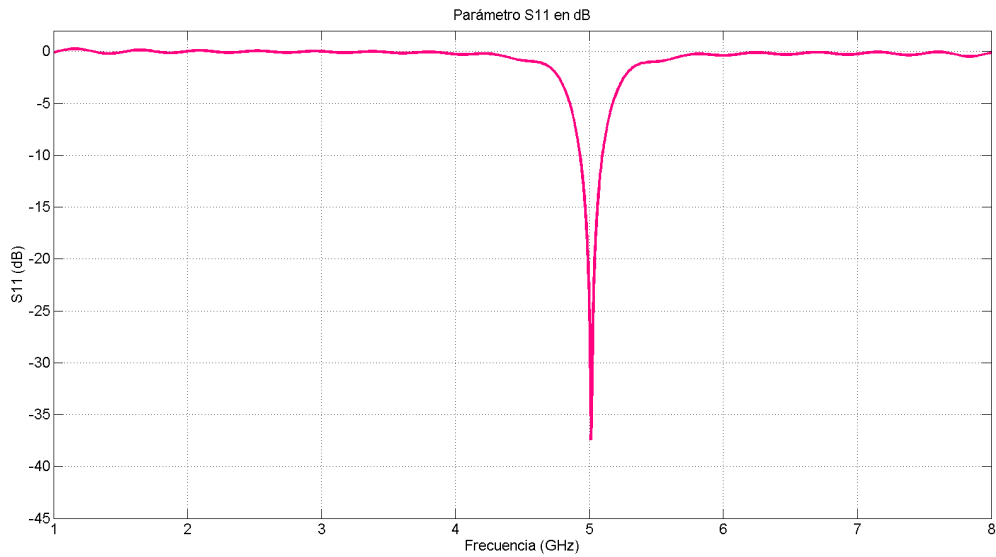


Figura 1.3: Representación típica del coeficiente de reflexión de una antena

Aplicaciones

Las antenas microstrip se han convertido en las protagonistas en un gran número de aplicaciones, como pueden ser la aviación, la aeronáutica, aplicaciones militares o satelitales. Su fabricación está presente en muchos ámbitos, de entre los que se pueden destacar los siguientes:

- Comunicaciones móviles y satelitales.
- Telemetría.
- Global Positioning System (GPS) (sistemas de geoposicionamiento global) y Radar.
- Radio Frequency Identification (RFID), usado a su vez en comunicaciones móviles, logística o medicina.
- Equipos de comunicaciones compatibles con WiMAX.
- Aplicaciones Bluetooth.

1.1.2. Métodos de alimentación

Existen diversas configuraciones para alimentar las antenas microstrip y se pueden englobar en dos grupos: métodos inductivos y métodos capacitivos [3].

Como métodos inductivos, destacan la línea microstrip y la sonda coaxial, caracterizados por ser métodos de alimentación *por contacto*. Ambos tipos se describen a continuación:

- La alimentación mediante *línea microstrip* (Figura 1.4) consiste en una tira conductora mucho más estrecha que el parche, consiguiendo que su impedancia característica sea de 50Ω . Es fácil de fabricar y analizar, sin embargo, a medida que aumenta el espesor del sustrato, aumentan también el grosor de la línea y las radiaciones espurias de la superficie del parche. Por tanto el ancho de banda se ve limitado y supone el principal inconveniente de este modo de alimentación.

Otro hecho a tener en cuenta es que, dado que la línea se sitúa en la cara radiante de la antena, su presencia afecta de forma directa a su diagrama de radiación, llegando incluso a deformarlo.

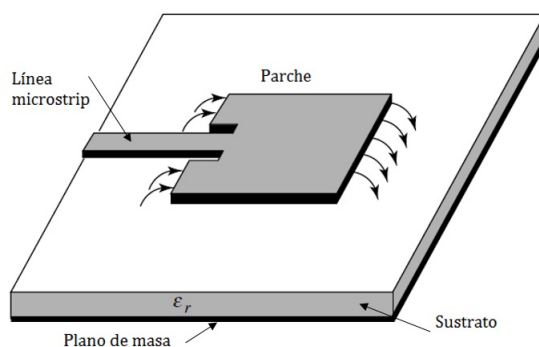


Figura 1.4: Alimentación de un parche con línea microstrip

- La *sonda coaxial* (Figura 1.5) consiste en dos conductores: un conductor externo conectado al plano de masa, y uno central que atraviesa la antena hasta conectar el parche de la otra cara de la antena. Debido a su simplicidad, es uno de los métodos de alimentación más utilizados, pero dado que es una alimentación por contacto, la banda de funcionamiento será más estrecha. En cuanto al sustrato, si éste es demasiado grueso, será más difícil conseguir una buena adaptación, ya que la inductancia introducida por el conector es proporcional a este grosor.

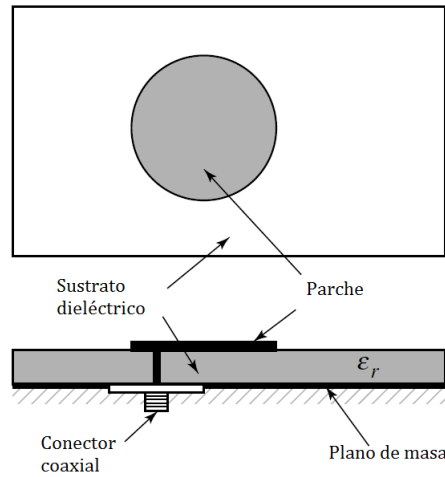


Figura 1.5: Alimentación de un parche con sonda coaxial

Como métodos capacitivos (o por acoplo), los más usados son por ranura y por acoplo electromagnético, que precisamente surgieron como alternativa para evitar los problemas de las configuraciones inductivas. Son conocidos como métodos *sin contacto*.

- La configuración mediante *ranura* es la más complicada de fabricar debido a su estructura. Consiste en dos sustratos separados por un plano de masa. Sobre el sustrato de arriba reposa la metalización. Una línea microstrip es colocada en la parte inferior del parche, cuya energía será acoplada a éste, a través de la ranura realizada en el plano de masa que separa los sustratos. La principal desventaja que presenta es la radiación (y por tanto pérdida de potencia) hacia atrás, debido a dicha ranura. En la Figura 1.6 se muestra esta configuración.

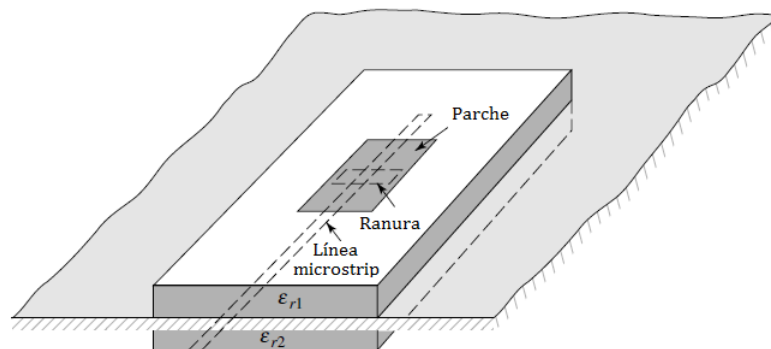


Figura 1.6: Alimentación de un parche mediante acoplo por ranura

- Por último, existe el *acoplo electromagnético*, también llamado *acoplo por proximidad*. Es, de las anteriores, la configuración que proporciona un mayor ancho de banda, y es sencilla de modelar. Sin embargo, su fabricación es ligeramente más compleja respecto a los métodos inductivos, ya que, además de necesitarse dos capas de sustrato, es bastante sensible a tolerancias. La Figura 1.7 ilustra esta configuración.

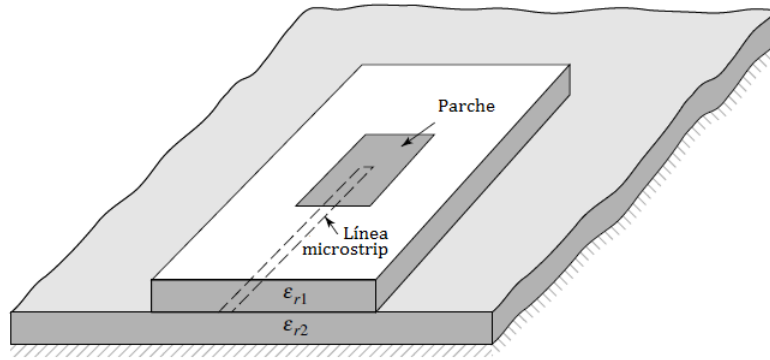


Figura 1.7: Alimentación de un parche mediante acoplo electromagnético

Todas las antenas diseñadas a lo largo de este TFG son alimentadas mediante un método **sin** contacto. El principal objetivo es el estudio de la variabilidad de la frecuencia, que supone una variación del tamaño del parche, por tanto, si se empleara un método de alimentación con contacto, el coaxial soldado a la antena se rompería cuando éste cambiara sus dimensiones.

1.1.3. Modelos de análisis

Existen diversos métodos de análisis de las antenas microstrip, que se introducen a continuación.

- El modelo de *línea de transmisión* es sencillo a la vez que poco preciso, aunque en análisis y modelado de acoplos (magnéticos o por ranura) se convierte en una labor tediosa. Aun así ofrece una clara visión de cómo funciona la antena.
- El modelo de *cavidad resonante* es más preciso que el anterior, a la vez que complejo. Ha sido el modelo escogido para el diseño de los parches en este TFG.

—→ Existe una tercera opción para el modelado de parches microstrip, denominado *modelo de onda completa*, siendo éste el caso que más se acerca a la realidad. Sin embargo, es tanta su complejidad, que en la práctica este modelo queda descartado y se usa cualquiera de los dos anteriores.

1.1.4. Parche rectangular

El parche rectangular es la configuración más usada en antenas de parche, y tanto el modelo de análisis de línea de transmisión como de cavidad resonante son bastante intuitivos. A continuación se detallan ambos casos.

Modelo de línea de transmisión

Como ya se indicó antes, este modelo es el más simple y a la vez menos exacto de todos. Su explicación se puede abordar en tres puntos diferentes:

- *Efectos de borde*: Debido a las dimensiones finitas del parche, los campos en los bordes de éste experimentan discontinuidades, como puede verse en la Figura 1.1. Estas discontinuidades son función de las dimensiones del parche y del espesor del sustrato, y deben tenerse en cuenta ya que de ellas depende la frecuencia de resonancia de la antena. Los efectos de borde hacen que la línea sea eléctricamente más ancha de lo que es en realidad, y dado que las líneas de campo viajan tanto en el aire como en el sustrato, necesario introducir una permitividad de referencia, ϵ_{reff} .

Este parámetro tiene en cuenta estos efectos de borde, haciendo que las propiedades y comportamiento de la Figura 1.8(a) equivalgan a aquellos de la Figura 1.8(b).

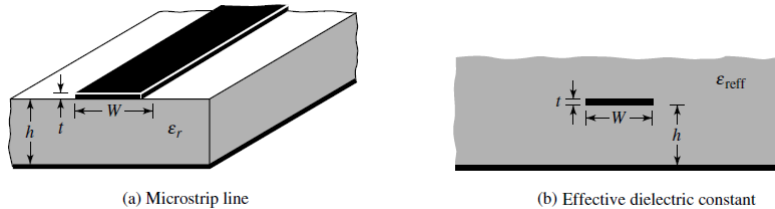


Figura 1.8: Línea microstrip (a) y constante dieléctrica efectiva (b)

El valor de ϵ_{reff} depende de la frecuencia. A medida que ésta aumenta, las líneas de campo se concentran en el sustrato, y por tanto la línea microstrip se comportará como una línea homogénea de un único dieléctrico. La permitividad de referencia ϵ_{reff} se aproximará entonces a la permitividad del sustrato ϵ_r (Ecuación (1.2)).

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (1.2)$$

- *Cálculo de parámetros:* Los efectos de borde hacen que la antena tenga una longitud y anchura efectivas ligeramente mayores a sus dimensiones físicas. Esta diferencia de dimensión se cuantifica en una distancia ΔL , que depende de la constante dieléctrica de referencia ϵ_{reff} y de la relación W/h de la línea microstrip.

Como se observa en la Figura 1.9, la longitud efectiva de la línea es:

$$L_{eff} = L + 2 \cdot \Delta L \quad (1.3)$$

lo que hace disminuir la frecuencia de resonancia para la cual la línea (el parche) tiene una longitud de $\lambda/2$, ya que frecuencia y longitud de onda son inversamente proporcionales.

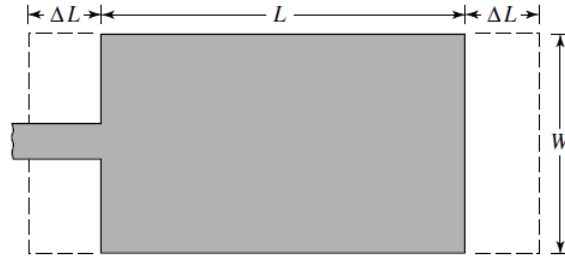


Figura 1.9: Longitud efectiva de una antena de parche debido a los efectos de borde

- *Diseño:* conociendo los valores de la constante dieléctrica del sustrato (ϵ_r), la frecuencia de resonancia (f_r) y el espesor del sustrato (h), los únicos parámetros desconocidos son las dimensiones del parche, W y L .

⇒ Mediante la Ecuación (1.4) se obtiene el valor de W

⇒ Mediante la Ecuación (1.2) se obtiene el valor de ϵ_{reff}

$$W = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1.4)$$

Modelo de cavidad resonante

Las antenas microstrip también pueden emular cavidades dieléctricas cargadas en más de una frecuencia de resonancia (o modo fundamental). Este modelo de análisis es más exacto que el anterior y cuando la geometría del parche difiere del rectangular (véase Figura 1.2), el modelo de línea de transmisión ya no es válido.

Esta configuración considera la antena como una cavidad dieléctrica delimitada por dos planos conductores arriba y abajo, y por cuatro planos magnéticos en las paredes laterales, simulando un circuito abierto. De este modo se producen ondas estacionarias entre ambas paredes (eléctrica y magnética). Es un modelo aproximado (Figura 1.10) pero cumple el requisito de no radiar potencia hacia su exterior.

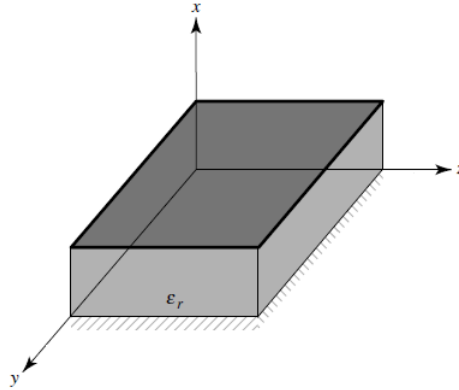


Figura 1.10: Parche microstrip rectangular como modelo de cavidad resonante

Generalmente la dimensión vertical de la cavidad (espesor del parche) es muy pequeña y por tanto se cumple que la variación del campo (ya sea eléctrico o magnético) en sentido vertical es prácticamente nula. Esto quiere decir que:

$$\begin{aligned} \Rightarrow H_z(z=0) \text{ y } H_z(z=h) \text{ deben ser nulos, entonces } H_z &= 0 \\ \Rightarrow \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0, \text{ entonces } E_z \text{ es constante} \end{aligned}$$

Por tanto se tienen modos TM en la dirección vertical, z . En el caso del parche rectangular, estos modos TM se obtienen de forma analítica. La frecuencia de resonancia de la cavidad es la recogida en la Ecuación (1.5), donde los valores L_{eq} y W_{eq} corresponden con las dimensiones equivalentes del parche considerando los efectos de borde.

$$f_{mn} = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{L_{eq}}\right)^2 + \left(\frac{n}{W_{eq}}\right)^2} \quad (1.5)$$

En la cavidad tendrán lugar diferentes distribuciones de campo (o modos) de acuerdo a las condiciones de contorno y soluciones de ecuación de onda homogénea [1]. El modo dominante (es decir, TM_{01}) corresponderá con la frecuencia de resonancia de la Ecuación (1.6), suponiendo que $L_{eq} > W_{eq}$. En caso contrario no habría mas que sustituir L_{eq} por W_{eq} .

En las antenas diseñadas en este TFG, el parche tiene forma rectangular, de modo que $L_{eq} = W_{eq}$.

$$f_{01} = \frac{c_0}{2L_{eq}\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.6)$$

1.2. POLÍMEROS ELECTROACTIVOS

1.2.1. Introducción

Polímero electroactivo, Electroactive Polymer (EAP) es el término genérico que se usa para multitud de materiales sintéticos, que poseen la característica de cambiar su forma cuando se les aplica una diferencia de potencial. Son, en esencia, *actuadores*.

Un actuador [4] es un dispositivo encargado de transformar energía (ya sea hidráulica, neumática o eléctrica) con la finalidad de activar un proceso, provocando así un efecto sobre éste. También se les conoce por el nombre de controladores o reguladores.

Existen varios tipos de actuadores: electrónicos, hidráulicos, neumáticos o eléctricos, siendo éstos últimos los que ocupan esta sección, y, en concreto, los *actuadores piezoeléctricos*. Éstos son capaces de producir movimiento basado en el fenómeno físico de la piezoelectricidad, cuando un campo eléctrico es aplicado al material. Dado que los EAP están compuestos de materiales flexibles, a menudo se les conoce como “actuadores suaves”, y se clasifican en dos grandes categorías [5]:

- ↪ Los *polímeros electroquímicos* usan el transporte masivo de iones como modo de cambio en su forma. Son capaces de ejercer altas presiones y funcionar con voltajes relativamente bajos. Son de tamaño reducido y limitado y energéticamente ineficientes.
- ↪ Los *polímeros activados por campo* usan un campo eléctrico para provocar este cambio de forma, mediante el accionamiento de las cargas dentro de éstos, o de manera inversa, buscan un cambio en su forma para generar un campo eléctrico. Sus principales características son la rapidez y la eficiencia, así como su inmunidad ante variaciones de temperatura o humedad. Pueden operar tanto a altos valores de voltaje, como a bajos valores de corriente. Esta última característica hace que se requieran componentes adicionales para la conversión de voltajes.

Los polímeros activados por campo son los que cobran importancia en este TFG, detallando sus características y modo de funcionamiento en las siguientes líneas de éste.

1.2.2. Elastómeros Dieléctricos

Un EAP [5], [6] activado por campo que reúna las propiedades de un polímero, es un elastómero dieléctrico, material inteligente con características y propiedades que no se han visto antes en otros materiales. Su estructura está compuesta por finas láminas de polímero, situando en ambos lados de éste dos electrodos hechos de un material flexible y elástico.

Mediante el uso de actuadores elastómeros dieléctricos es posible alcanzar una alta eficiencia de transducción de energía eléctrica en energía mecánica. Este material tiene una alta velocidad de respuesta, una alta tasa de compresión, alta presión y densidad de potencia de 1 W/g (la densidad de potencia de un músculo humano es aproximadamente de $0,2 \text{ W/g}$).

Un EAP posee características similares a los materiales piezoeléctricos, no obstante, la energía eléctrica generada y la eficiencia de conversión de energía mecánica en eléctrica son mayores para el primer caso, además de multiplicar la densidad energética por un factor de aproximadamente 20 a la correspondiente en un cristal piezoeléctrico sencillo.

1.2.3. Principio de operación

Los elastómeros dieléctricos se basan en la respuesta electro-mecánica de una capa elastómera y un electrodo en cada una de sus caras. Estos actuadores operan bajo el principio mostrado en la Figura 1.11: cuando se aplica una diferencia de potencial a ambos lados de los electrodos, el polímero se comprime en espesor a la vez que se expande en área, lo cual obliga a los electrodos a ser flexibles frente a cambios en el tamaño del elastómero. Este espesor es capaz de variar hasta un 100 % [7].

La característica más destacable de este fenómeno es que el volumen neto de la lámina elastómera es siempre el mismo en todo el proceso, ya sea de compresión o de expansión.

La respuesta de la capa elastómera es la causa, principalmente, de la interacción de las cargas electrostáticas de los electrodos: las cargas opuestas en ambos electrodos se atraen, mientras que las cargas iguales se repelen. Basándose en este sencillo modelo electrostático, puede darse un valor empírico de la presión que se ejerce sobre los electrodos, que es función de la diferencia de potencial aplicada:

$$\rho = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{V}{t} \right)^2 \quad (1.7)$$

donde ϵ_0 y ϵ son la permitividad del espacio libre ($8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$) y la permitividad relativa del elastómero, respectivamente. V es el voltaje aplicado y t es el espesor de la capa elastómera (el sustrato). La permitividad relativa el elastómero puede tomar valores comprendidos entre 1 y 12, mientras que la del vacío es constante e igual a 1. Esto quiere decir que la presión aumenta sustancialmente en los polímeros con respecto al vacío para el mismo campo eléctrico aplicado.

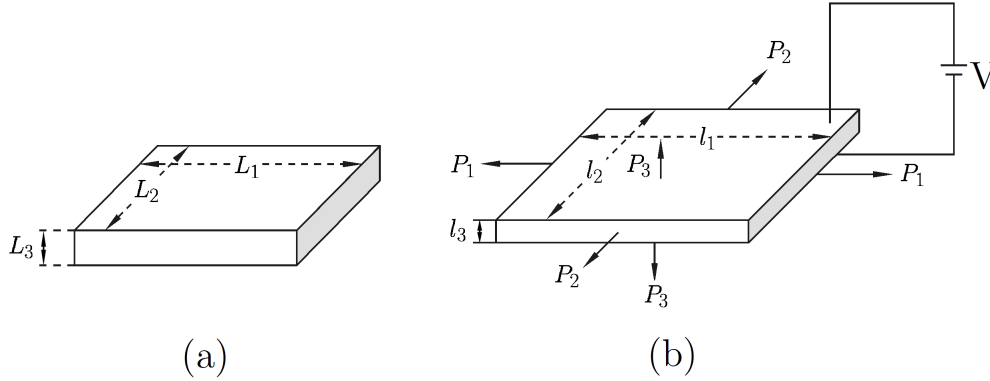


Figura 1.11: Principio de funcionamiento de los elastómeros dieléctricos

Los elastómeros dieléctricos poseen una mayor densidad y potencia de actuación a la de los actuadores magnéticos y electrostáticos, y provocan una compresión del material mayor que éstos. En este TFG se presentan antenas de parche reconfigurables mecánicamente (mediante el uso de este dieléctrico) cuya principal ventaja es que no limitan la linealidad del sistema, a diferencia de los métodos comunes de implementación de estas antenas, como son los diodos PIN, interruptores GaAs o RF-MEMS [8].

1.2.4. Aplicaciones

Los elastómeros son manejables en muchos entornos de trabajo, lo que permite un diseño personalizable y en tamaños de dispositivos que varían desde algunos micrómetros hasta varios metros. Además de ser ligeros y capaces de deformarse, los movimientos a los que dan lugar asemejan a acciones biónicas o movimientos musculares humanos. Muestran sensaciones flexibles y naturales que otros sistemas motorizados no pueden imitar. Estos materiales se han empleado para la realización de músculos artificiales, superficies táctiles programables (como tablas de lectura Braille), generadores eléctricos y dispositivos ópticos adaptativos.

Entre los dispositivos creados con este material, destacan brazos robot, robots nadadores o rep-tadores, robots de inspección compactos, incluso robots para escalar paredes, cruzar techos, o volar.

Capítulo 2

DISEÑO DEL PARCHE

En este capítulo se muestran las simulaciones de una antena de parche rectangular (es decir, su comportamiento en frecuencia) en función de diferentes sustratos dieléctricos. La frecuencia de trabajo del sistema se encuentra en banda S ($3 - 30 \text{ GHz}$), en concreto, $f = 5 \text{ GHz}$.

El parche se alimentará por proximidad, descartando la alimentación de tipo coaxial (de contacto) ya que el diseño final consistirá en un parche que cambie su tamaño, y un conector con contacto se rompería.

2.1. PRESENTACIÓN DE LOS MATERIALES

La respuesta en frecuencia de la antena variará en función de la permitividad del sustrato. En este TFG se dispondrá de un total de cuatro sustratos, con permitividades dieléctricas y espesores reales, recogidos en la Tabla 2.1.

<i>Nº</i> Sustrato	Permitividad	Espesor (mm)
1	$\epsilon_r = 2,2$	0,787
2		3,175
3	$\epsilon_r = 3,38$	0,5
4		1,5

Tabla 2.1: Sustratos dieléctricos disponibles

2.2. ESTRUCTURA DEL PARCHE

2.2.1. Introducción: parámetros y bloques de la antena

A partir de la Ecuación (2.1) es posible calcular la dimensión longitudinal (y por tanto transversal) de nuestro parche cuadrado, de modo que su tamaño a la frecuencia de trabajo sea $\lambda/2$:

$$\lambda = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

siendo c la velocidad de la luz en el vacío, f la frecuencia de trabajo de nuestro sistema y ϵ_r la permitividad relativa del sustrato.

Dado que se tienen dos permitividades diferentes ($\epsilon_r = 2,2$ y $3,38$) se determinará una dimensión de partida para cada una de ellas, que más tarde se modificarán debido a la longitud efectiva y los efectos de borde mencionados en la sección 1.1.4. Los cálculos para una frecuencia de 5 GHz y un valor de c_0 (velocidad de la luz en el vacío) de $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, se recogen a continuación:

- Sustratos **1** y **2**: con una permitividad de $\epsilon_r = 2,2$, de la Ecuación (2.1) se tiene $\lambda = 40,42 \text{ mm}$, y por tanto, el parche tendrá unas dimensiones iniciales de $20,21 \times 20,21 \text{ mm}$.
- Sustratos **3** y **4**: los mismos cálculos se han realizado para el caso de una permitividad de $\epsilon_r = 3,38$, obteniendo un tamaño inicial del parche de $16,3 \times 16,3 \text{ mm}$.

Como ya se ha ilustrado en la Figura 1.1, la antena estará formada por un plano de masa, un tipo de sustrato y el parche. En este TFG se añadirá además una capa adicional correspondiente al material elastómero dieléctrico con las propiedades descritas en la sección 1.2.

La antena de parche estará formada por los siguientes componentes:

- *Plano de masa*: material conductor perfecto, o Perfect Electrical Conductor (PEC) situado en la parte posterior de la antena.
- *Sustrato*: se superpondrán dos capas, una encima de otra, previendo la futura inserción de una línea microstrip entre ambas para una correcta alimentación de la antena mediante acoplo electromagnético. Se ha decidido que la permitividad de ambas capas sea siempre la misma para cumplir con el requisito de la Ecuación (2.1).

- *Elastómero dieléctrico*: de un espesor mínimo en comparación con el sustrato anterior o el plano de masa, y de dimensiones laterales iguales al sustrato. Se ha marcado una permitividad relativa ϵ_r de 1,2.
- *Parche*: centrado en la antena y de dimensiones mitad, el parche de cobre estará situado encima del dieléctrico elastómero, en la cara radiante de la antena. Se ha dado por supuesto que el parche es flexible y que es capaz de deformarse, igual que elastómero.
- *Puertos*: en primer lugar se alimentará la antena con un puerto discreto, y a continuación con puerto de guía de onda. Se profundiza sobre esto en la sección 2.2.3, pero son únicamente opciones de simulación. En la práctica se instalará un conector coaxial de tipo SMA.

2.2.2. Creación de la antena

El software *CST Studio Suite* [9] permite la inserción de parámetros que establecen las dimensiones de la antena, y cuando sea necesaria cualquier modificación, bastará insertar el valor deseado del parámetro pertinente, sin necesidad de volver a crear la antena desde cero.

Inicialmente, se insertan los parámetros recogidos en la Tabla 2.2, pues más adelante se introducirán algunos más.

Nombre	Valor inicial (mm)	Descripción
W	20,21	Tamaño del parche
t	0,005	Espesor del parche
s	1,3	Espesor del plano de masa
h	0,091	Espesor del dieléctrico elastómero
h_1	Tabla 2.1	Espesor del sustrato

Tabla 2.2: Parámetros introducidos en CST Studio Suite

La inserción de cada uno de los bloques (plano de masa, sustratos, ...), se lleva a cabo a través de la opción *Objects* \rightarrow *Basics Shapes* \rightarrow *Brick* de *CST* ([10], [11]). La Figura 2.1 muestra el asistente de creación de cada uno de los bloques, de acuerdo a la Tabla 2.3.

Es importante destacar que el origen de coordenadas se ha establecido en la parte opuesta al parche microstrip, es decir, la cara exterior del plano de masa.

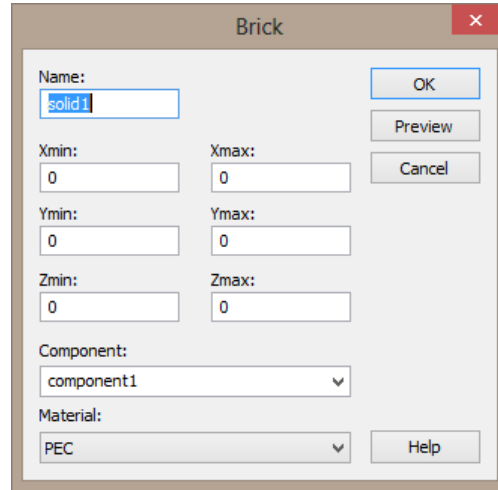


Figura 2.1: Creación de nuevos bloques en CST Studio Suite

Para la inserción de todos los bloques de que consta la antena, se seleccionará *component1* en la opción *Component* y el material correspondiente en la opción *Material*, como se indicó en la sección 2.2.1.

Componente	(X_{max}, X_{min})	(Y_{max}, Y_{min})	(Z_{max}, Z_{min})
Plano de masa	$(-W, W)$	$(-W, W)$	$(0, s)$
Primera lámina de sustrato	$(-W, W)$	$(-W, W)$	$(s, s + h1)$
Segunda lámina de sustrato	$(-W, W)$	$(-W, W)$	$(s + h1, s + 2 \cdot h1)$
Lámina dieléctrica elastómera	$(-W, W)$	$(-W, W)$	$(s + 2 \cdot h1, s + 2 \cdot h1 + h)$
Parche microstrip	$(-W/2, W/2)$	$(-W/2, W/2)$	$(s + 2 \cdot h1 + h, s + 2 \cdot h1 + h + t)$

Tabla 2.3: Dimensiones de los bloques de la antena de parche

Las Figuras 2.2 y 2.3 ilustran cómo está compuesta la antena de este capítulo, y de acuerdo con las líneas precedentes, habrá un plano de masa (blanco), dos capas del mismo sustrato (verde), una fina lámina de elastómero dieléctrico (azul) y en la parte superior un parche (amarillo) de tamaño mitad con respecto al resto de la antena.

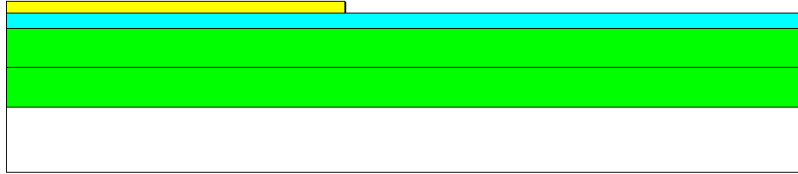


Figura 2.2: Vista de la sección de la antena de parche

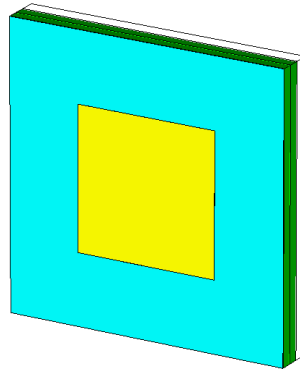


Figura 2.3: Vista en perspectiva de la antena de parche

2.2.3. Inserción de los puertos

Como se introdujo anteriormente, existen dos tipos de puertos en las simulaciones presentes en este TFG: **puerto discreto** y **puerto de guiaonda**, y serán el punto de entrada de la energía al resto del sistema (en este caso, la antena). Se usará el primero de ellos únicamente para adaptar la antena a la frecuencia deseada (es decir, ajustar sus dimensiones) y el segundo para todas las demás simulaciones en los posteriores capítulos. Alimentando la antena mediante acoplo electromagnético, el puerto discreto ofrecerá unos resultados mucho más realistas.

El comportamiento en frecuencia de la antena es similar en ambos casos, aunque los pasos a seguir para la inserción de los puertos son diferentes. Tanto para uno como para otro, estará situado a una distancia aproximada de $\frac{W}{6}$ con respecto al centro del parche, aunque esta posición variará ligeramente para conseguir una mayor adaptación a la frecuencia de trabajo.

El puerto discreto posee propiedades inductivas que en ocasiones pueden interferir en la simulación de *CST Studio Suite*, mientras que el puerto de guíaonda no presenta este problema, a menos que las condiciones de contorno no se hayan especificado correctamente.

En general, ambos tipos de puerto realizan una simulación rápida excepto cuando se elige un valor pequeño de malla (*mesh*), parámetro que puede modificarse accediendo al menú *Mesh* \rightarrow *Global Mesh Properties* de *CST*. Un valor adecuado para evitar diferencias entre simulaciones es de 10 líneas por longitud de onda.

Puerto Discreto

Para la inserción de un puerto discreto es necesario acudir a la opción de menú *Solve* \rightarrow *Discrete Ports* [12]. El asistente de creación del mismo se muestra en la Figura 2.4 y vendrá completado con los datos de la Tabla 2.4:

Figura 2.4: Creación de un puerto discreto en *CST*

(X_1, X_2)	(Y_1, Y_2)	(Z_1, Z_2)
$(0, 0)$	$(W/6, W/6)$	$(s + 2 \cdot h_1 + h + t, s)$

Tabla 2.4: Coordenadas del puerto discreto

Con esta configuración, el puerto discreto unirá dos planos: el exterior del parche microstrip y el común entre el plano de masa y el sustrato inferior (Figura 2.5).

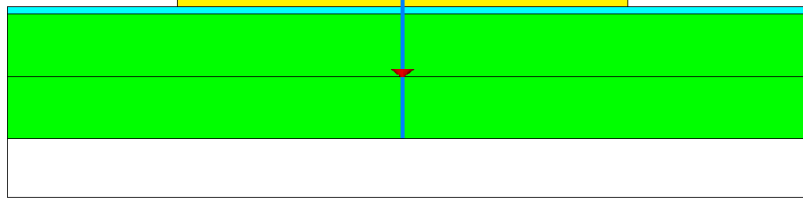


Figura 2.5: Situación del puerto discreto en la antena

Puerto de guía de onda

El puerto discreto será sustituido por un puerto de guía de onda cuando se haya adaptado la antena correctamente a la frecuencia deseada. Debido a este puerto la antena se alimentará mediante acoplo electromagnético, como se mostró en la Figura 1.7.

Como paso previo a la inserción del puerto, es necesaria una línea microstrip entre ambas láminas de sustrato que alimente por proximidad al parche microstrip. La creación de este nuevo bloque sigue los mismos pasos que los demás (*Objects* \rightarrow *Basics Shapes* \rightarrow *Brick*), pero antes es necesario calcular los parámetros de la línea.

A través del menú *Macros* \rightarrow *Calculate* \rightarrow *Calculate Analytical Line Impedance* y seleccionando *Thin Microstrip*, como muestra la Figura 2.6, es posible calcular los parámetros básicos de una línea de transmisión microstrip: altura del sustrato, permitividad relativa, impedancia de referencia, y anchura. En este caso el único valor que se desconoce es la anchura w (que en *CST* corresponderá al nuevo parámetro p), y vendrá calculado a partir de los otros tres:

- La altura del sustrato es conocido y es propio del sustrato que se esté usando (materiales presentados en la sección 2.1).
- Del mismo modo, la permitividad depende del sustrato, y puede ser de 2,2 o de 3,38.
- La impedancia de referencia, que a lo largo de todo el documento es de $50\ \Omega$.

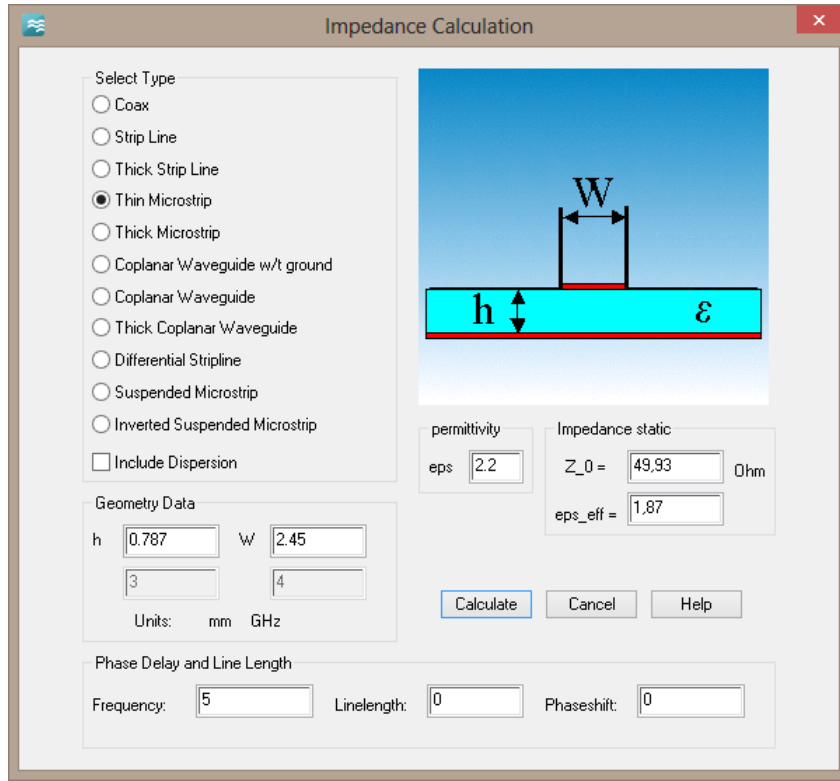


Figura 2.6: Cálculo de parámetros de una línea microstrip

El *Brick* correspondiente a la línea microstrip sigue las coordenadas de la Tabla 2.5. El nuevo parámetro *reach* marca (desde el origen de coordenadas) hasta dónde llega la línea, con el propósito de adaptar de un manera óptima la antena a los 5 GHz. Dado que se trata de una línea microstrip delgada, se considerará de altura 0 ($Z_{max} = Z_{min}$). Su posicionamiento exacto en la antena se muestra en la Figura 2.7.

Componente	(X_{max}, X_{min})	(Y_{max}, Y_{min})	(Z_{max}, Z_{min})
Línea Microstrip	$(-W, reach)$	$(-p/2, p/2)$	$(-s - h_1, -s - h_1)$

Tabla 2.5: Dimensiones de la línea microstrip

Una vez creada y configurada correctamente la línea, es necesario acudir al menú *Solve* \rightarrow *Waveguide Ports* para la inserción del puerto de guía de onda. El asistente de configuración es el mostrado en la Figura 2.8.

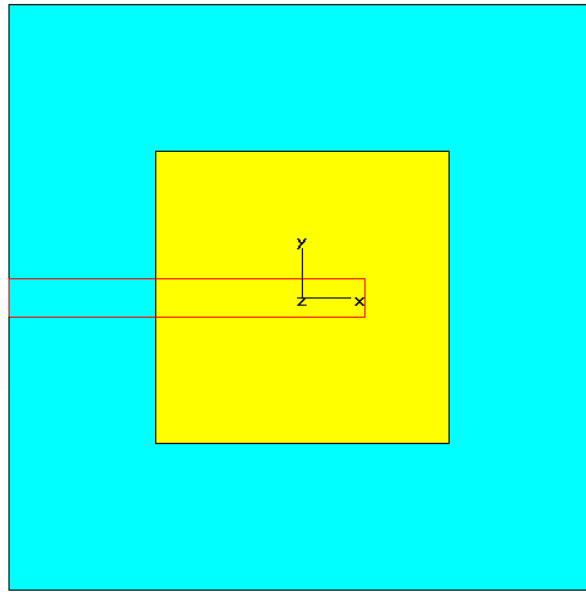


Figura 2.7: Situación de la línea microstrip en la antena

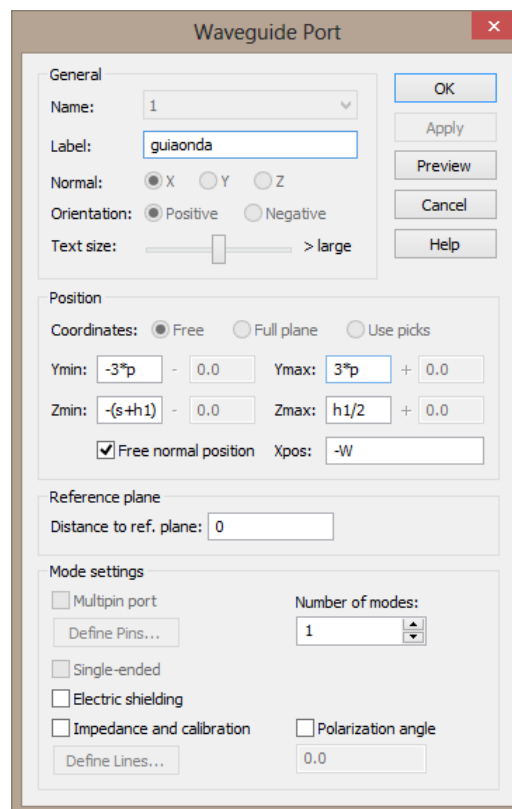


Figura 2.8: Configuración del puerto de guía de onda en la antena

El puerto estará situado en un lateral de la antena (perpendicular a ella), donde empieza la línea microstrip, y debe contener todo el plano de masa y la línea, excluyendo el parche. Las Figuras 2.9 y 2.10 muestran la situación exacta de este puerto (evidenciado en rojo).

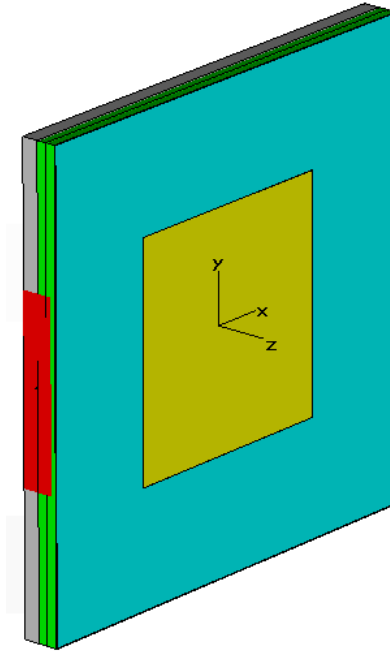


Figura 2.9: Puerto de guía de onda en la antena: perspectiva

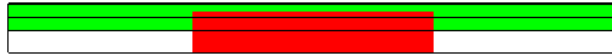


Figura 2.10: Puerto de guía de onda en la antena: perfil

2.3. SIMULACIÓN

Antes de proceder con las primeras simulaciones es necesario especificar un rango de frecuencias. Dado que el parche trabajará en banda S y la frecuencia de trabajo será 5 GHz , un intervalo válido puede ser $(f_{min}, f_{max}) = (1\text{ GHz}, 8\text{ GHz})$, que puede configurarse a través del menú *Solve* \rightarrow *Frequency* de *CST*.

Para proceder con la simulación es necesario acudir al menú *Solve* \rightarrow *Transient Solver* y seleccionar *Start*. A continuación se muestran los resultados de las simulaciones para cada uno de materiales disponibles, así como los cambios efectuados en las dimensiones de la antena. Las explicaciones son más detalladas para el primer caso, dado que los siguientes siguen el mismo procedimiento de ajuste de tamaño del parche y posicionamiento óptimo de los puertos.

2.3.1. Permitividad $\epsilon_r = 2,2$

Para los dos sustratos siguientes se considerará el parámetro W de valor de $\lambda/2 = 20,21\text{ mm}$ (de acuerdo con la Ecuación (2.1)) y todos los demás parámetros como se definieron en las Tablas 2.2 y 2.3.

Espesor $0,787\text{ mm}$

Las primeras simulaciones se harán con una alimentación del parche mediante puerto discreto, y posteriormente se sustituirá por uno de guía de onda. La primera simulación (Figura 2.11) nos muestra un primer resultado del parámetro S_{11} (coeficiente de reflexión a la entrada) y su situación cercana a la frecuencia deseada 5 GHz .

Reduciendo el tamaño de la antena, se consigue un aumento en su frecuencia de resonancia, haciendo posible el ajuste de frecuencia, de unos $4,6\text{ GHz}$ a los 5 GHz mencionados anteriormente. Tras varias simulaciones, el valor de W ha disminuido hasta un valor de $18,5\text{ mm}$ y su correspondiente simulación resulta en la Figura 2.12.

Este resultado puede mejorarse, modificando la posición del puerto discreto del parche. Un cambio pequeño en la posición del puerto discreto no hará cambiar la frecuencia de trabajo del parche, sino que se traducirá en una mayor adaptación y por tanto una caída más abrupta en el parámetro S_{11} .

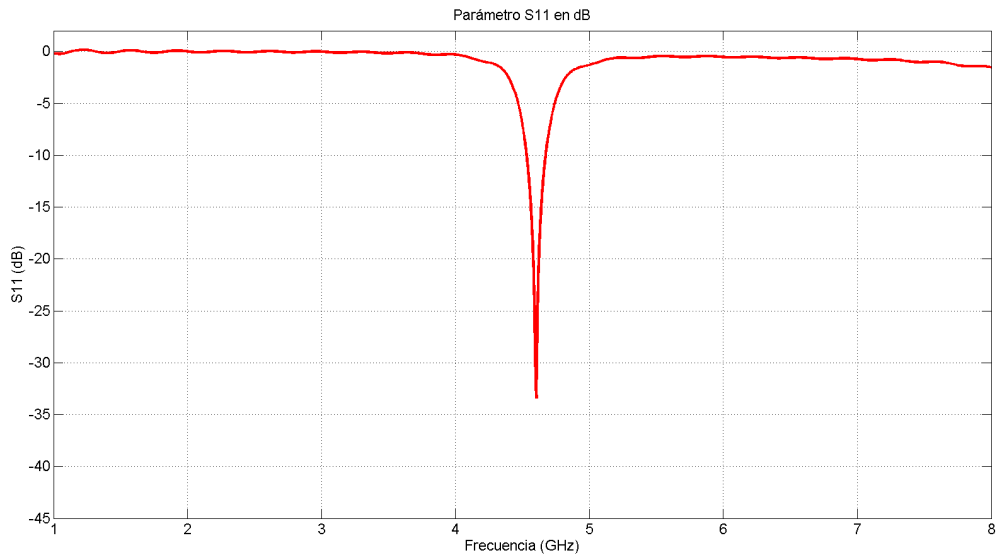


Figura 2.11: Sustrato 1: $W = 20,21 \text{ mm}$

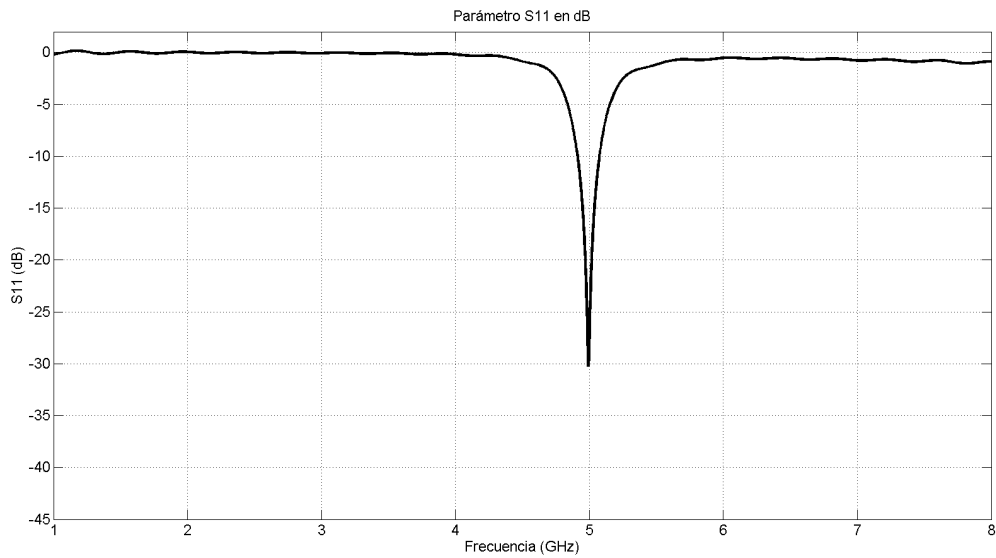


Figura 2.12: Sustrato 1: $W = 18,5 \text{ mm}$

Para encontrar el punto óptimo de este puerto la simulación que es necesaria efectuar es la de *Parameter Sweep* (o barrido). Acudiendo al menú *Solve* \rightarrow *Transient Solver* y seleccionando *Par. Sweep* se abre el asistente mostrado en la Figura 2.13. A través de la opción *New Sweep Parameter* es posible dar a un parámetro concreto unos valores dentro de un intervalo, y escoger tras la simulación el valor que mejor resultados proporcione.

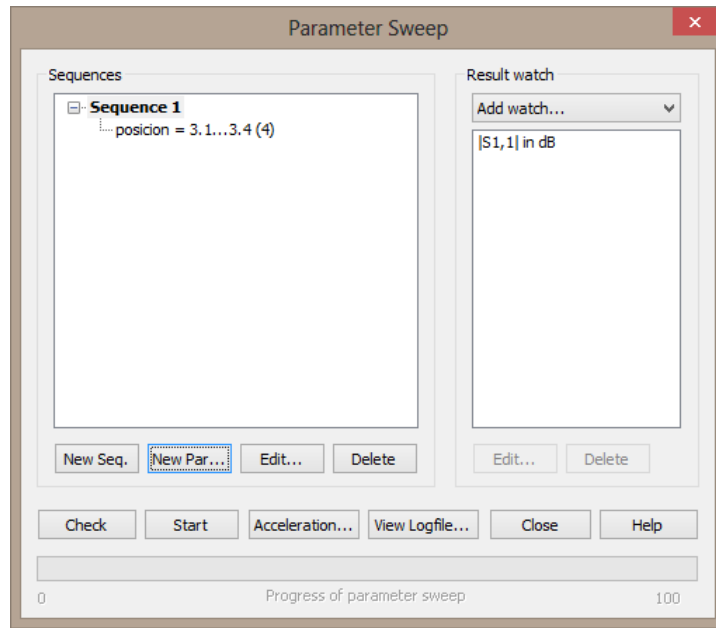


Figura 2.13: Asistente de configuración de barrido de parámetros

El parámetro cuyo valor se desea optimizar es *posicion*, que determina dónde se inserta el puerto discreto. Un valor de $W/6$ equivale a $3,08 \text{ mm}$ ($W = 18,5 \text{ mm}$), de modo que el barrido se hará en torno a este valor. En la Figura 2.14 puede verse que los valores insertados han sido 3,1, 3,2, 3,3 y 3,4 mm .

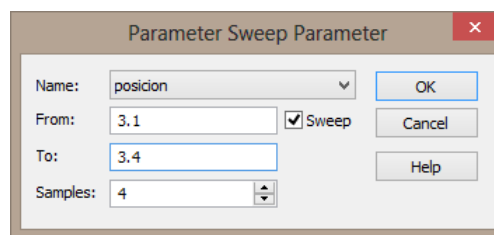


Figura 2.14: Barrido: inserción de un nuevo parámetro

La Figura 2.15 refleja el resultado de la simulación, en donde se ha hecho un zoom en el intervalo de frecuencias $(f_{min}, f_{max}) = (4,8 \text{ GHz}, 5,2 \text{ GHz})$. Por tanto, el valor óptimo del parámetro *posicion* es de $3,2 \text{ mm}$. La simulación individual para *posicion* = 3,2 se muestra en la Figura 2.16.

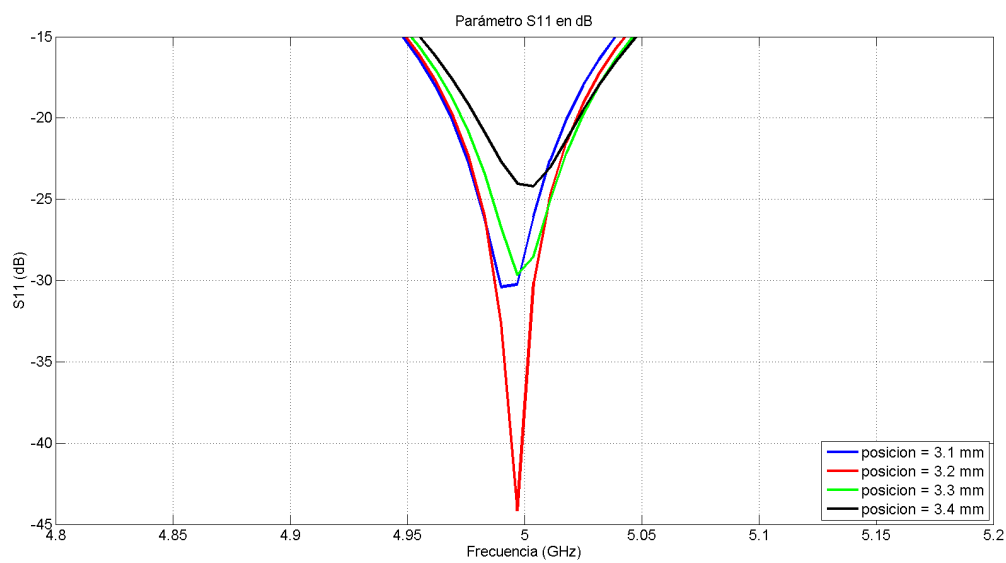


Figura 2.15: Barrido: resultado de la simulación

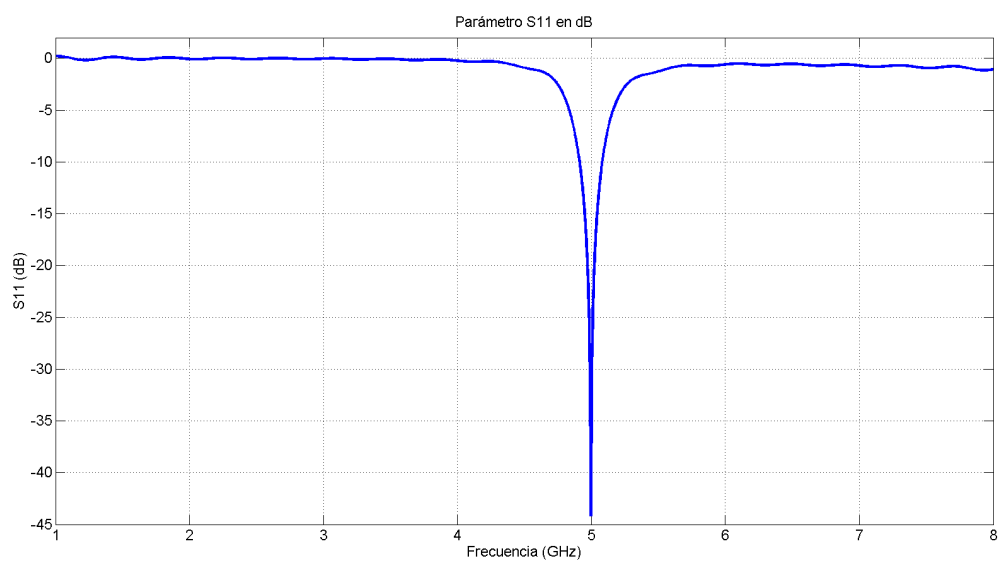


Figura 2.16: Sustrato 1: optimizado del puerto discreto, $posicion = 3,2\text{ mm}$

Con el objetivo de dar una visión general de las últimas simulaciones, se han recogido todas en una única gráfica, ilustrada en la Figura 2.17.

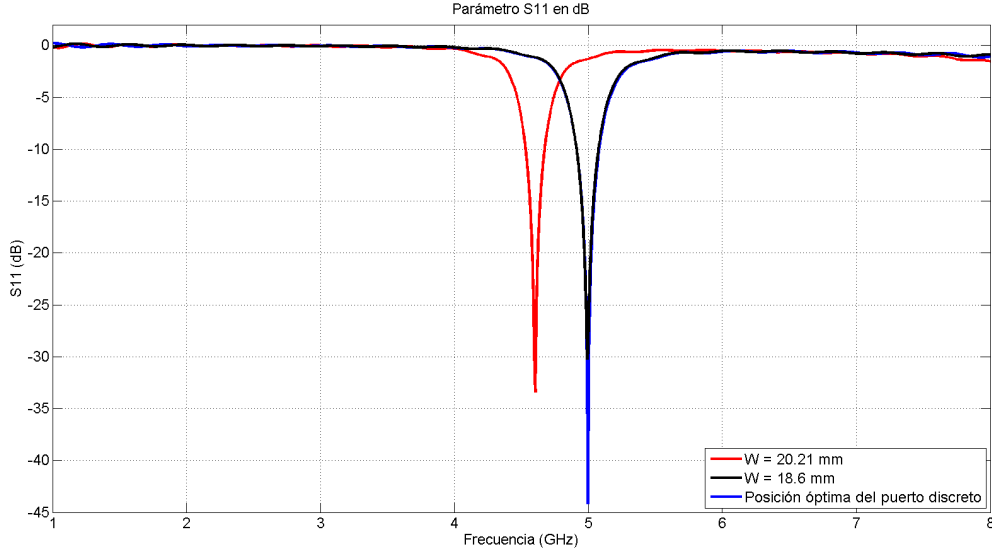


Figura 2.17: Sustrato 1: Evolución del parámetro S_{11}

A continuación es necesario calcular los parámetros de la línea microstrip con el calculador de la Figura 2.6 sabiendo que:

- El sustrato está caracterizado por una permitividad de 2,2 y un espesor de 0,787 mm.
- La impedancia de referencia es de 50 Ω .

Se obtiene un valor del parámetro $p = 2,45$ mm. Con la inserción de una línea de estas características (que llega hasta el centro geométrico del parche, aunque luego se optimizará su posición) y un puerto de guía de onda como se explicó en la sección 2.2.3, la simulación que resulta es la mostrada por la Figura 2.18.

Del mismo modo que se optimizó la posición del puerto discreto con un barrido del parámetro *posicion*, es necesario ahora el mismo procedimiento con el parámetro *reach*, para situar la línea microstrip hasta el punto que proporcione un mejor resultado en frecuencia del parámetro S_{11} . Este valor es de $reach = 4$ mm. Con este nuevo valor, la simulación final proporciona la respuesta en frecuencia de la Figura 2.19.

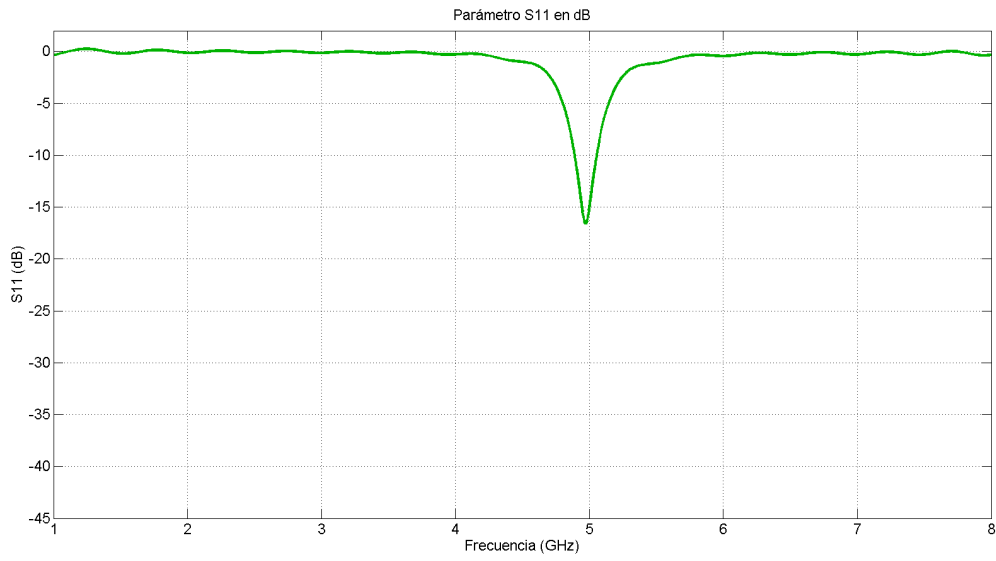


Figura 2.18: Sustrato 1: línea microstrip y puerto guíaonda

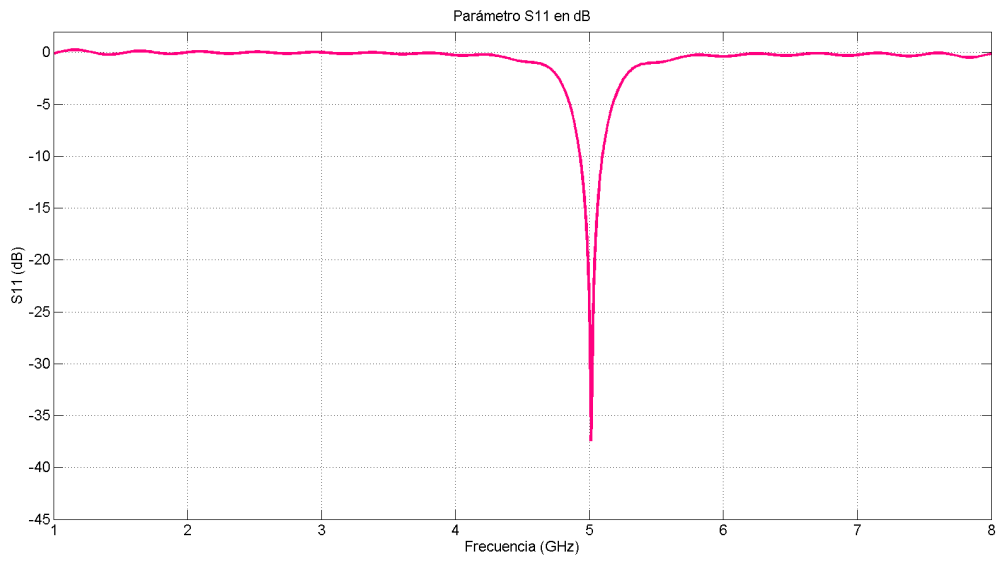


Figura 2.19: Sustrato 1: línea microstrip y puerto guíaonda. Solución óptima

Espesor 3,175 mm

La inserción del puerto de guía de onda se ha llevado a cabo correctamente al inicio de la presente sección, pero es necesario ajustar el tamaño del parche para conseguir la frecuencia de resonancia de 5 GHz. Este valor es $W = 16,8 \text{ mm}$.

Otro de los parámetros que debe recalcularse es la anchura de la línea microstrip situada entre ambos sustratos. Mediante el calculador de la Figura 2.6, e introduciendo los datos pertinentes, se obtiene un valor de $p = 9,865 \text{ mm}$.

La simulación para este sustrato (en el que el parámetro *reach* de la línea microstrip se considera optimizado) es la mostrada en la Figura 2.20, donde se observa una diferencia notable con las simulaciones anteriores. Esto es debido a una anchura demasiado gruesa de ambas capas de sustrato, así como una línea microstrip demasiado ancha ($9,865 \text{ mm}$ frente a los $2,45 \text{ mm}$ del sustrato anterior).

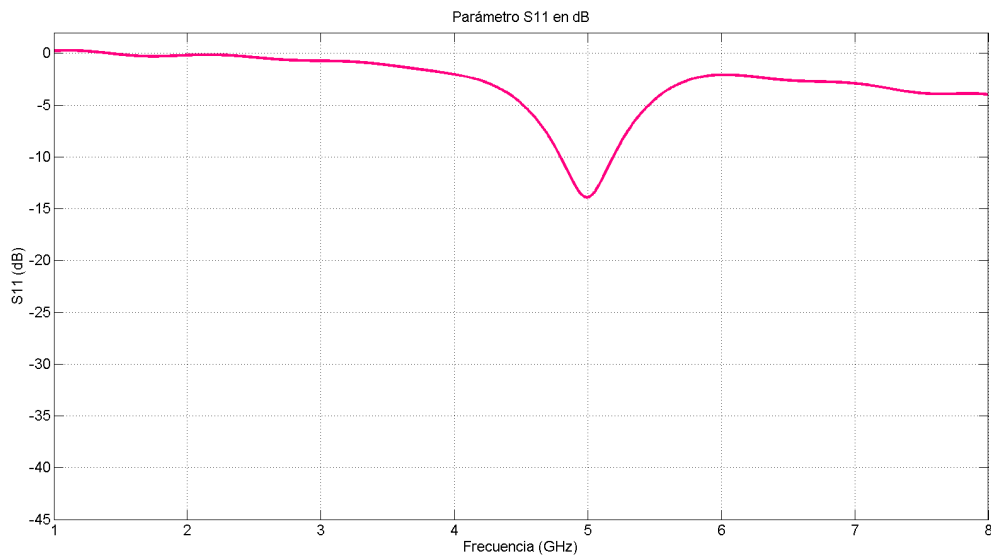


Figura 2.20: Sustrato 2: línea microstrip y puerto guíaonda

2.3.2. Permitividad $\epsilon_r = 3,38$

Para una permitividad de 3,38, y a partir de la Ecuación (2.1) se obtiene un tamaño inicial de parche de $16,31 \text{ mm}$. El resto de parámetros son los definidos en las Tablas 2.2 y 2.3.

Espesor $0,5 \text{ mm}$

→ Figura 2.21: Ajuste del tamaño del parche y de la posición del puerto discreto. El tamaño del parche se reduce de los $16,31 \text{ mm}$ iniciales a $15,4 \text{ mm}$, centrando así la frecuencia en los 5 GHz objetivo.

Respecto a la configuración del puerto discreto, inicialmente se sitúa a una distancia $W/6$ del centro del parche, y, después de realizar una simulación en barrido de parámetro, su valor cambia a $2,45 \text{ mm}$ (anteriormente era de $\frac{W}{6} = 2,56 \text{ mm}$), resultando en una caída logarítmica mayor.

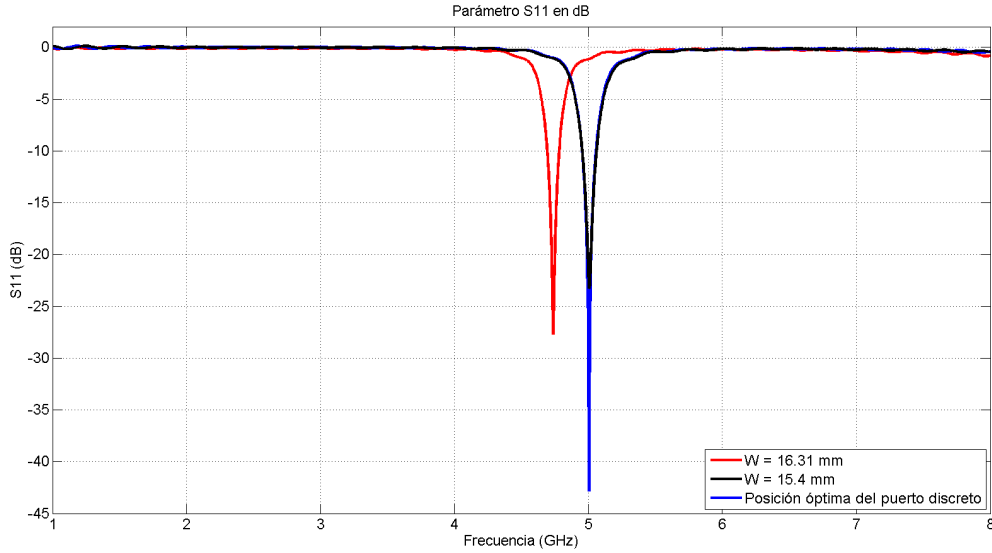


Figura 2.21: Sustrato 3: Evolución del parámetro S_{11}

→ Figura 2.22: inserción de una línea microstrip que llega hasta el centro del parche (aunque luego se prolongará algunos milímetros más) y anchura $p = 1,1674 \text{ mm}$ (Figura 2.6).

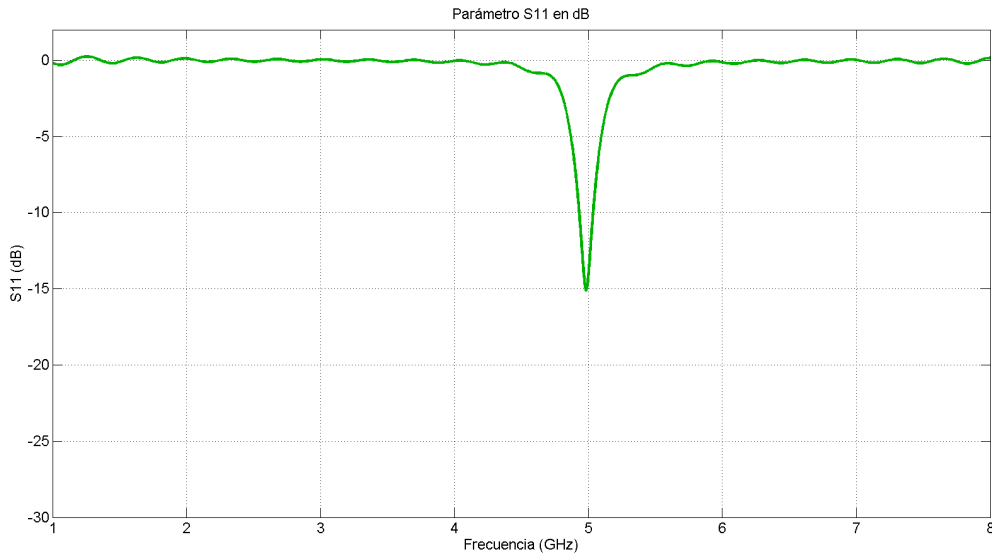


Figura 2.22: Sustrato 3: línea microstrip y puerto guíaonda

→ Figura 2.23: Simulación final con una longitud de línea microstrip que sobrepasa el centro del parche en 4 mm , que es el valor que toma el parámetro *reach*.

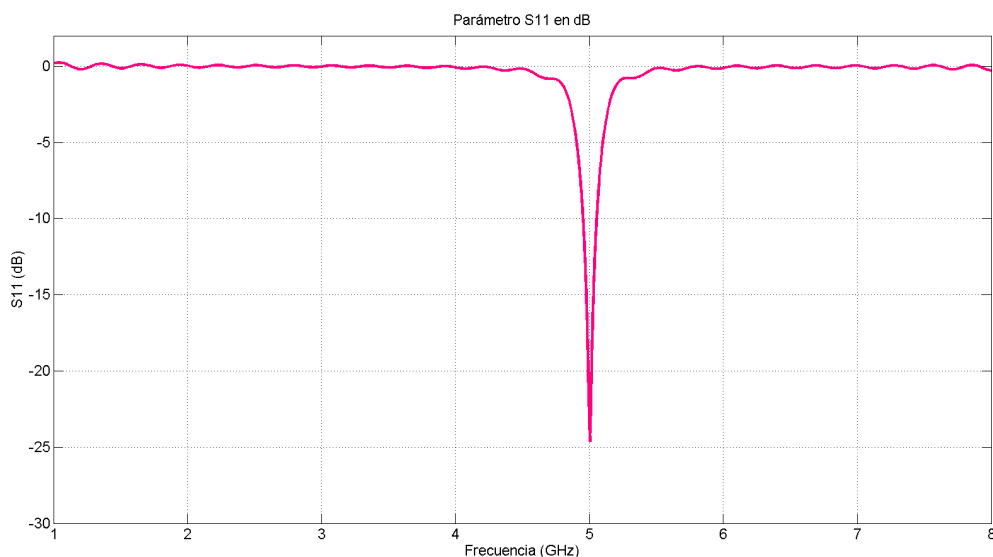


Figura 2.23: Sustrato 3: línea microstrip y puerto guíaonda. Solución óptima

Espesor 1,5 mm

En este caso se ha ajustado el tamaño del parche, desde los 16,31 mm iniciales hasta 14,9 mm , para adaptar el parche a 5 GHz . De igual modo a la sección 2.3.1 se mostrarán los resultados a partir de la inserción del puerto de guíaonda.

La anchura de la línea microstrip (calculada como en la Figura 2.6) será de 6,95 mm . La Figura 2.24 muestra la simulación correspondiente para una antena de parche con sustrato de espesor 1,5 mm y permitividad 3,38. Se considera que el parámetro *reach* de la línea ya ha sido optimizado, valiendo 4 mm . De igual modo al sustrato de espesor 3,175 mm y $\epsilon_r = 2,2$ la gráfica ofrece buenos resultados, pero la línea microstrip es bastante gruesa, además de que el espesor del sustrato triplica su valor con respecto al caso anterior.

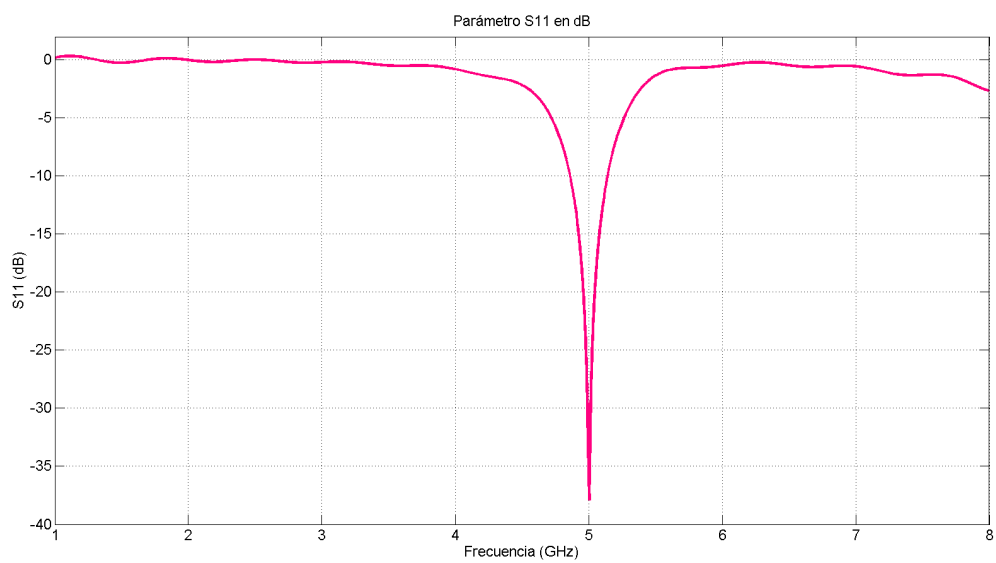


Figura 2.24: Sustrato 4: línea microstrip y puerto guíaonda

2.4. DIAGRAMA DE RADIACIÓN

A continuación se mostrarán los diagramas de radiación para los parches presentados en las secciones 2.3.1 y 2.3.2.

Para ello, en *CST Studio Suite* se debe seleccionar la opción *Solve* \rightarrow *Field Monitors*. Aparecerá en pantalla el asistente de la Figura 2.25, donde se deberá seleccionar el tipo “Farfield/RCS” e introducir, en este caso, una frecuencia de 5 GHz. *Solve* \rightarrow *Transient Solver* \rightarrow *Start*, y los resultados quedarán almacenados bajo la carpeta denominada *Farfields*.

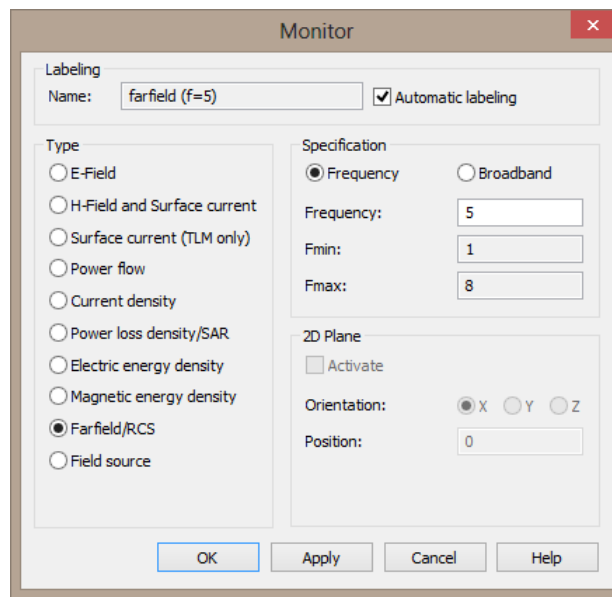
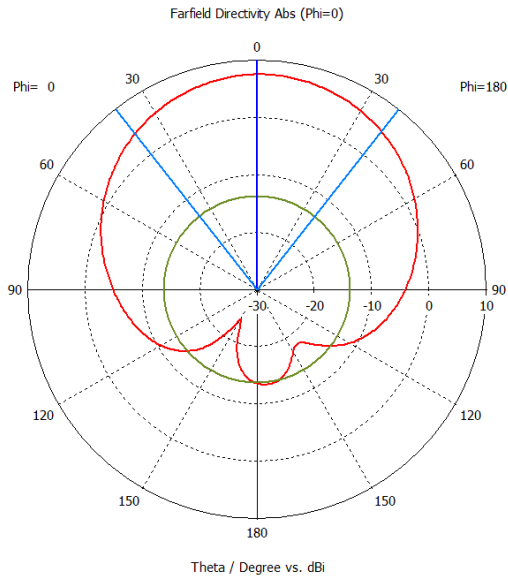
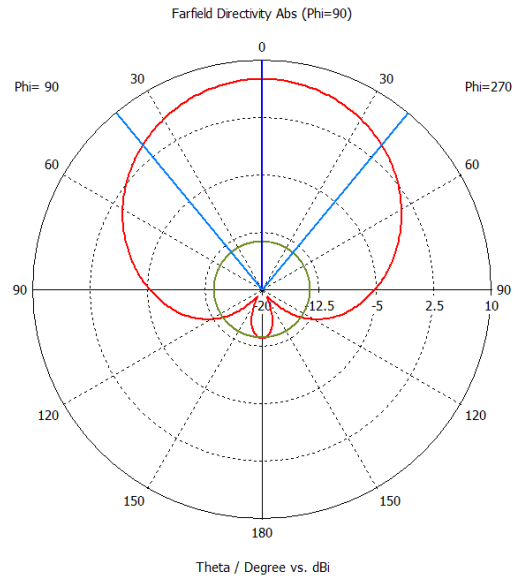


Figura 2.25: Diagrama de radiación: nuevo ‘field monitor’

Las gráficas 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9 corresponden respectivamente con los diagramas de radiación de los parches de sustratos 1, 2, 3 y 4 de la Tabla 2.1. En ellos se han representado los dos planos principales, es decir, $\phi = 0^\circ$ y $\phi = 90^\circ$.

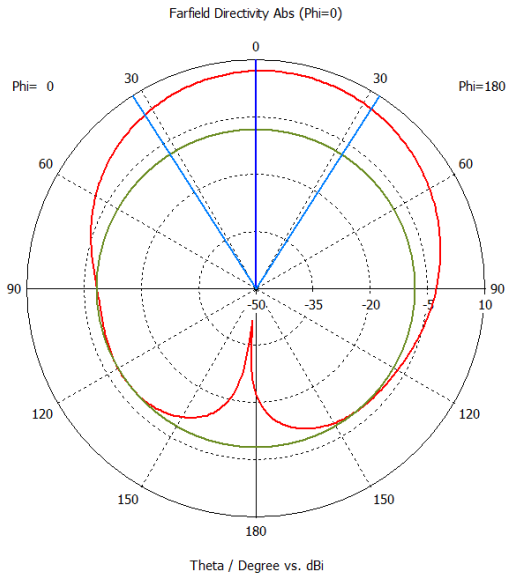


(a) $\phi = 0^\circ$ en coordenadas polares

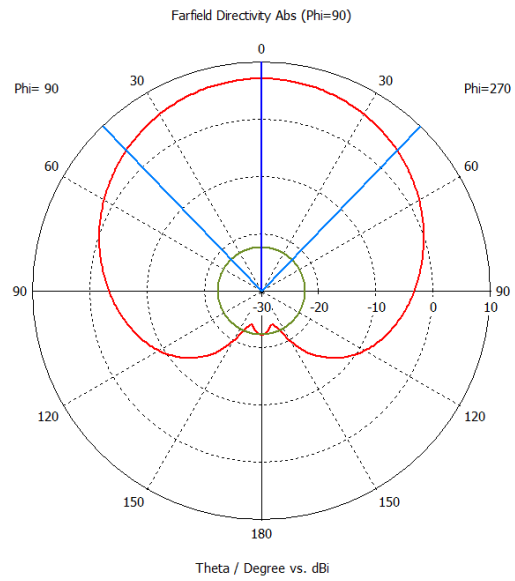


(b) $\phi = 90^\circ$ en coordenadas polares

Tabla 2.6: Sustrato 1: Diagramas de radiación

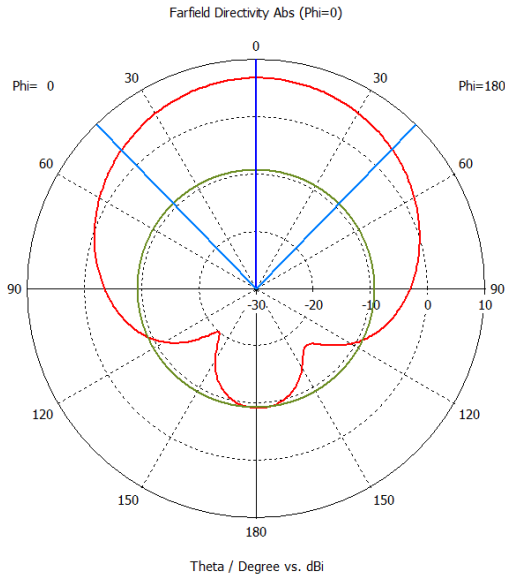


(a) $\phi = 0^\circ$ en coordenadas polares

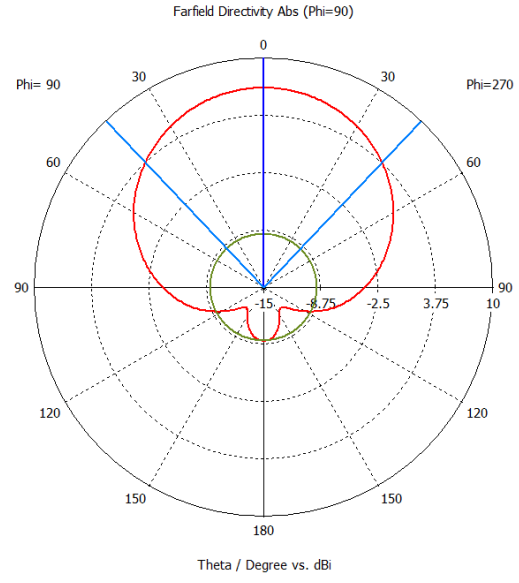


(b) $\phi = 90^\circ$ en coordenadas polares

Tabla 2.7: Sustrato 2: Diagramas de radiación

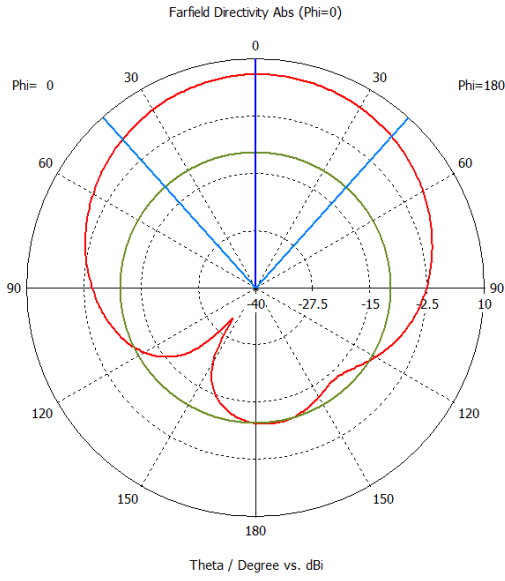


(a) $\phi = 0^\circ$ en coordenadas polares

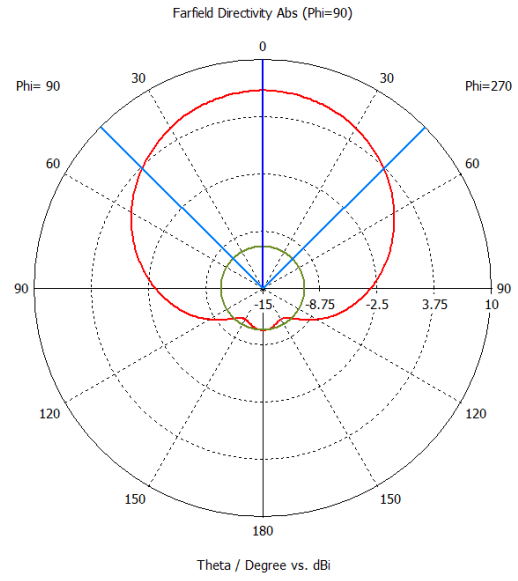


(b) $\phi = 90^\circ$ en coordenadas polares

Tabla 2.8: Sustrato 3: Diagramas de radiación



(a) $\phi = 0^\circ$ en coordenadas polares



(b) $\phi = 90^\circ$ en coordenadas polares

Tabla 2.9: Sustrato 4: Diagramas de radiación

2.5. CONCLUSIONES

En esta última sección se han obtenido unas conclusiones en base a las simulaciones efectuadas. Se puede decir que:

- El *primero* de los sustratos proporciona una buena respuesta en frecuencia, debido a su reducido espesor y baja permitividad. La línea microstrip tiene unas dimensiones (tanto en longitud como en espesor) coherentes con el resto de la antena.
- El *segundo* tiene un espesor mucho mayor al primero (3,175 frente a 0,787 mm), lo que se traduce en una línea microstrip extremadamente gruesa. El diagrama de radiación, por otro lado, es poco directivo. Por tanto, se descarta este sustrato para el estudio de la variabilidad en frecuencia o para una futura fabricación.
- El *tercer* sustrato, de permitividad mayor que los dos anteriores, supone un parche de menores dimensiones, y a priori, menor ganancia. El diagrama de radiación es bastante similar al primer sustrato, aunque las diferencias más notables se encuentran en el ancho de banda (es ligeramente más reducido en este caso).
- El *cuatro* sustrato, es de espesor tres veces mayor que el anterior, e igualmente proporciona una buena respuesta en frecuencia. No obstante, la línea microstrip para alimentar el parche es de grandes dimensiones, de modo que también se descarta este sustrato.

En la Tabla 2.10 quedan reflejados los datos más importantes de las gráficas del presente capítulo, y demuestran las conclusiones extraídas a partir de ellas. Del mismo modo, se han recogido todas las respuestas en frecuencia de cada antena en la Figura 2.26.

A partir de los diagramas de radiación de 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9, queda presente que comparten una radiación similar: máxima en la dirección broadside (eje z) y cierta radiación hacia atrás.

Se escogen, por tanto, los sustratos *primero* y *tercero* para un futuro estudio de la variabilidad en frecuencia y una posible fabricación.

- Sustrato 1: $\epsilon_r = 2,2$ y $h = 0,787 \text{ mm}$.
- Sustrato 3: $\epsilon_r = 3,38$ y $h = 0,5 \text{ mm}$.

<i>Nº</i> simulación	Caída máxima (dB)	Frecuencia de resonancia (GHz)	Ancho de banda a -10 dB (MHz)
1	-37,43	5,011	170
2	-13,89	4,997	400
3	-24,62	5,004	110
4	-37,91	5,008	280

Tabla 2.10: Conclusiones: Respuesta en frecuencia de todos los parches (Valores numéricos)

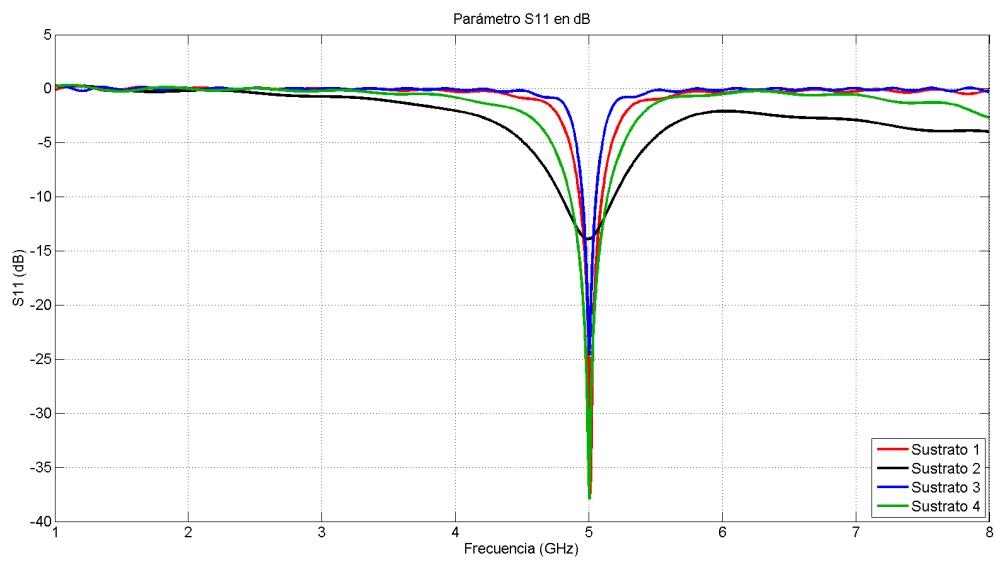


Figura 2.26: Conclusiones: Respuesta en frecuencia de todos los parches (Gráfica)

Capítulo 3

DEFORMADO DEL PARCHÉ

3.1. PRESENTACIÓN DE LOS MATERIALES

En el capítulo precedente se han mostrado los resultados para cada tipo de sustrato y tamaño fijo del parche, de modo que la frecuencia de trabajo del sistema era siempre 5 GHz . En esta sección se hará un estudio sobre la variabilidad de la frecuencia en base a la deformación del elastómero, ya que es la forma de hacer una antena reconfigurable en frecuencia, siendo éste el objetivo principal de este TFG.

Frecuencia y longitud de onda son inversamente proporcionales (Ecuación 2.1), de modo que se espera que a la vez que el elastómero se expanda en área y comprima en espesor, la frecuencia de resonancia de la antena disminuya.

Partiendo de las últimas simulaciones del capítulo anterior, el parche corresponderá al representado en la Figura 2.2, debiéndole añadir una línea microstrip entre ambos sustratos y un puerto de guíaonda en la parte lateral (Figuras 2.7 y 2.9).

Como se justificó en el capítulo precedente, los sustratos escogidos son dos, y se muestran en la Tabla 3.1, que a su vez es una versión reducida de la Tabla 2.1 (en la sección 2.1).

<i>Nº</i> Sustrato	Permitividad	Espesor (mm)
1	$\epsilon_r = 2,2$	0,787
3	$\epsilon_r = 3,38$	0,5

Tabla 3.1: Sustratos dieléctricos para deformado del parche

3.2. RESULTADOS

El espesor del elastómero dieléctrico usado en las simulaciones precedentes es de 0,091 *mm* y será el punto de partida para ambos casos (sustratos 1 y 3). Teóricamente, este material puede alcanzar una compresión en espesor de hasta un 100 % respecto de su valor inicial, pero en este caso se ha considerado un valor más reducido, 30 %. Esto supone un valor mínimo aproximado de 0,051 *mm*. Las simulaciones se han efectuado con cambios de espesor del elastómero en pasos de 0,010 *mm*, considerando, como se introdujo en la sección 1.2.3, volumen constante.

La Tabla 3.2 recoge los datos correspondientes a cada una de las simulaciones llevadas a cabo en *CST Studio Suite* y sus correspondientes parámetros involucrados:

- espesor del elastómero dieléctrico (h , en milímetros),
- tamaño adquirido del parche (W , en milímetros),
- frecuencia de funcionamiento (f , en *GHz*).

<i>Nº</i> simulación	h (mm)	Sustrato 1		Sustrato 3	
		W (mm)	f (GHz)	W (mm)	f (GHz)
1	0,091	18,60	5,00	15,40	5,00
2	0,081	19,61	4,77	16,43	4,72
3	0,071	20,95	4,45	17,55	4,43
4	0,061	22,60	4,20	18,93	4,12
5	0,051	24,71	3,82 y 7,45	20,70	3,78 y 7,42

Tabla 3.2: Deformado del parche: variabilidad de parámetros

(Nota: la antena tiene unas dimensiones $2W \times 2W$, y, en cada caso, ambas capas dieléctricas son del mismo sustrato)

Las Figuras 3.1 y 3.2 representan de manera gráfica los valores de la Tabla 3.2. La primera de ellas corresponde al sustrato de constante dieléctrica $\epsilon_r = 2,2$ y espesor $0,787\text{ mm}$, mientras que la segunda, al sustrato de $\epsilon_r = 3,38$ y espesor $0,5\text{ mm}$.

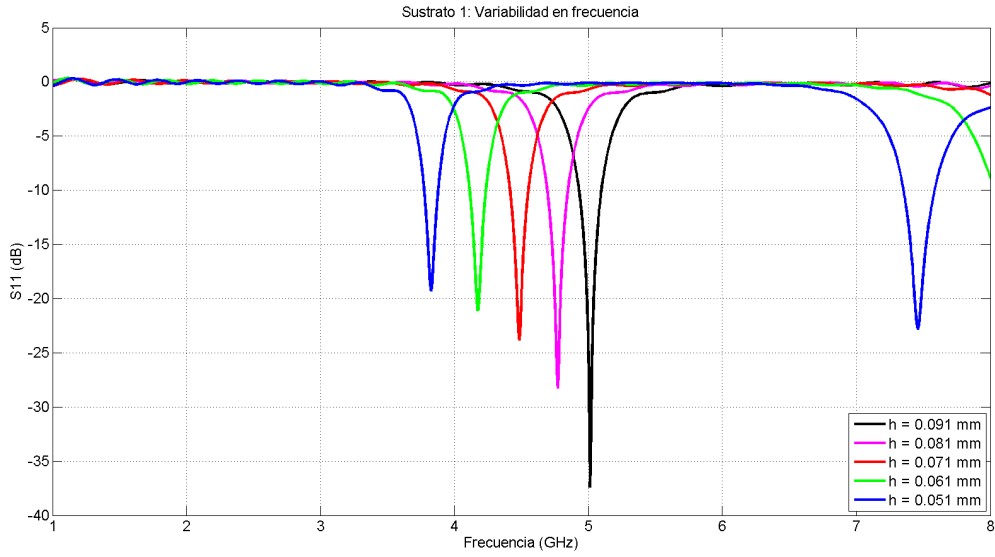


Figura 3.1: Sustrato 1: Variabilidad en frecuencia

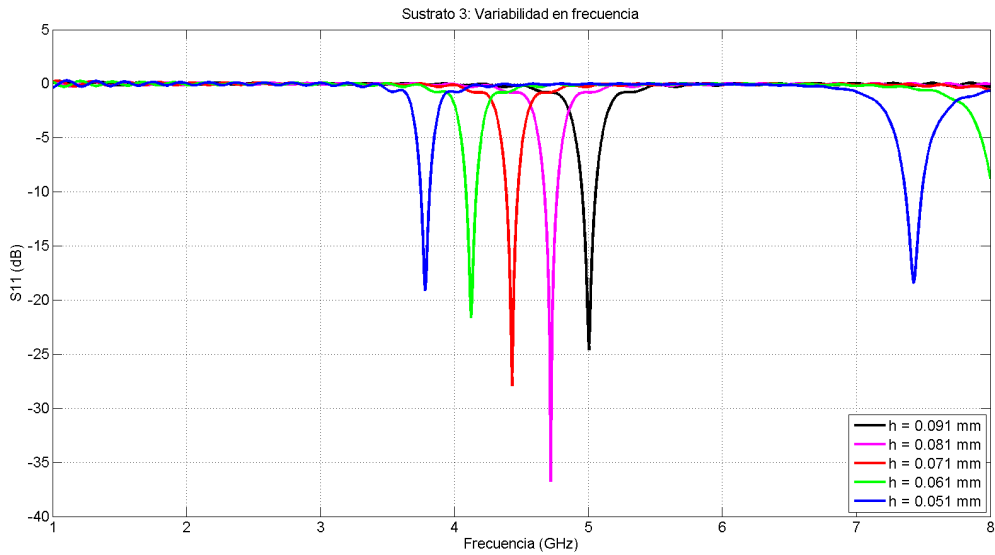


Figura 3.2: Sustrato 3: Variabilidad en frecuencia

3.3. CONCLUSIONES

A partir de la Tabla 3.2 y las gráficas de las Figuras 3.1 y 3.2 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Ambos parches se deforman de manera apreciable, lo que da lugar a una variación significativa en la frecuencia de trabajo, tal y como se pretendía. Igualmente se observa que la adaptación a la frecuencia de resonancia en cada caso sigue siendo excelente, lo que se traduce en unos resultados de muchísimo interés para una futura realización de una antena reconfigurable.
- Las frecuencias de resonancia de los nuevos parches (debido a la deformación del elastómero) son aproximadamente las mismas, de modo que cualquiera de los dos valdría para una misma aplicación si se tuviera que seleccionar una.
- En ambos casos aparece una segunda frecuencia de resonancia para el valor más grande de W , y se encuentra en torno a los $7,4\text{ GHz}$.
- De nuevo el primer sustrato presenta mejores soluciones, pues su ancho de banda a -10 dB es ligeramente superior.
- El coeficiente de reflexión S_{11} toma valores de adaptación similares en todos los casos.
- Las dimensiones del parche son mayores para el sustrato de menor permitividad relativa, ya que longitud de onda y permitividad son inversamente proporcionales.

En la Tabla 3.3 se muestran de nuevo las frecuencias de resonancia para ambos casos, así como su variabilidad en frecuencia con respecto a los 5 GHz iniciales. Se observa que estas variaciones son similares, lo cual también quedó justificado en el primer punto.

<i>N</i> ^o simulación	Sustrato 1		Sustrato 3	
	Δf (%)	f (GHz)	Δf (%)	f (GHz)
1	0	5,00	0	5,00
2	4,6	4,77	5,6	4,72
3	11	4,45	11,4	4,43
4	16	4,20	17,6	4,12
5	23,6	3,82	24,4	3,78

Tabla 3.3: Deformado del parche: variabilidad de la frecuencia

Capítulo 4

DOBLE ANTENA DE PARCHE

Con el propósito de fabricación, se plantea una nueva simulación con una estructura de antena diversa a las vistas en los capítulos precedentes. Únicamente el volumen del elastómero comprendido entre dos superficies de diferente potencial sufrirá deformación, de modo que es necesario añadir un segundo parche microstrip en la anten. Así, ambos parches (paralelos e idénticos) actuarán como electrodos, provocando dicha deformación en el elastómero [8].

4.1. INSERCIÓN DE UNA CAPA METÁLICA ADICIONAL

En la Figura 4.1 se muestra la disposición de las capas metálicas mencionadas anteriormente. Se ha aplicado esta estructura para dos tipos de antena, cada una con un sustrato diferente. Estos sustratos son los mismos que se escogieron en el capítulo precedente (Tabla 3.1).

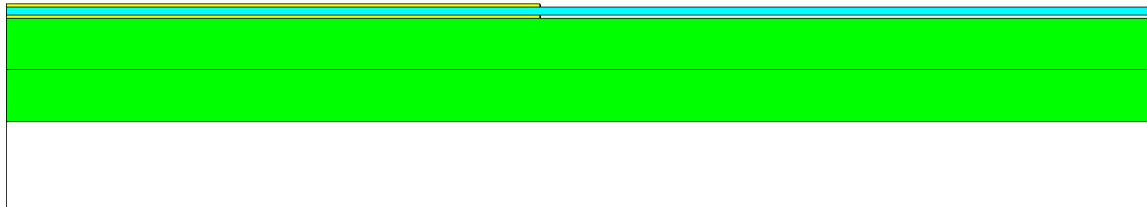


Figura 4.1: Antena de doble parche microstrip

4.2. SIMULACIÓN

En las Figuras 4.2 y 4.3 se muestran las respuestas en frecuencia de cada una de las antenas.

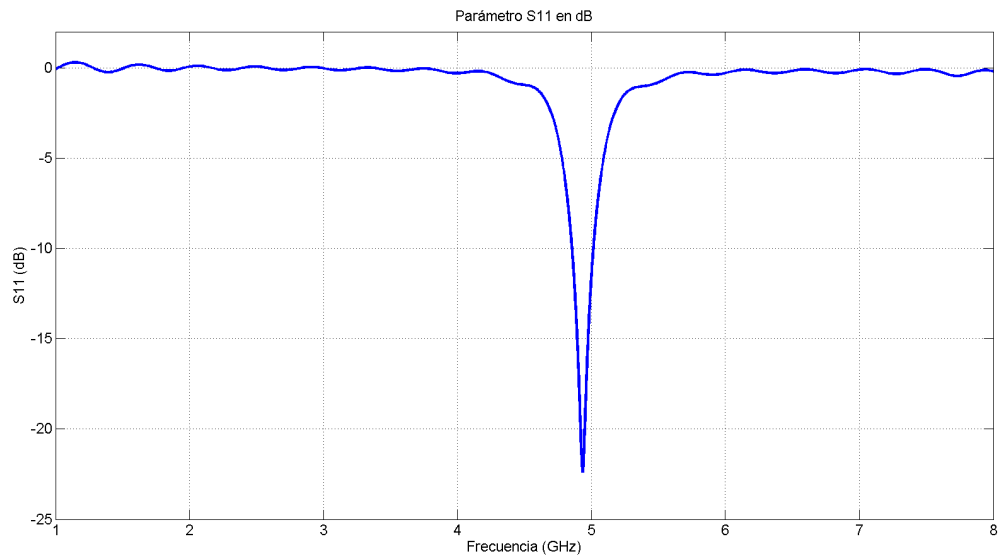


Figura 4.2: Sustrato 1: Respuesta en frecuencia de antena de doble parche

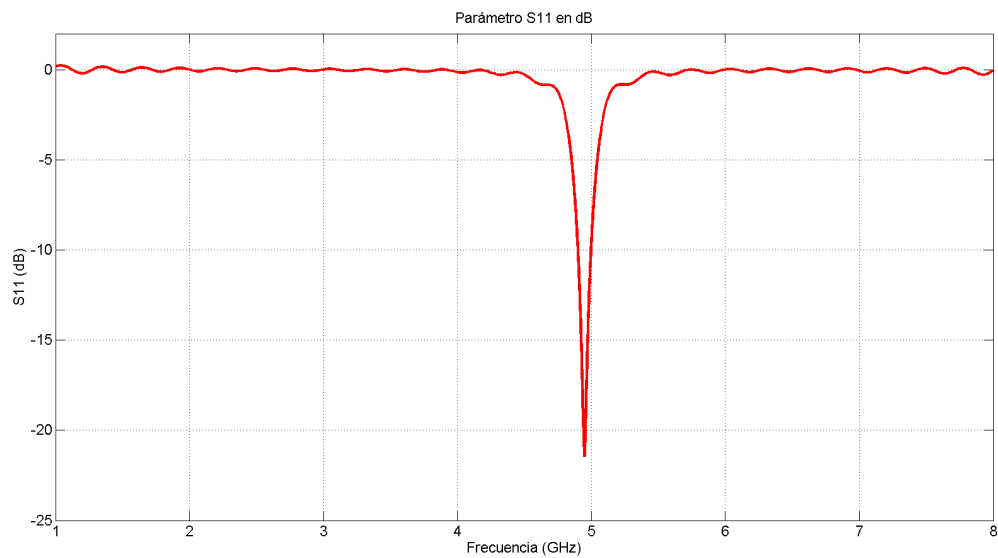
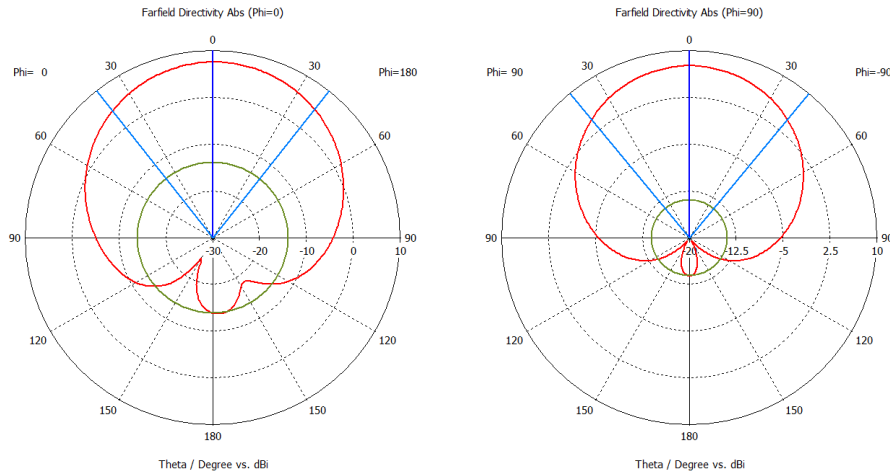


Figura 4.3: Sustrato 3: Respuesta en frecuencia de la antena de doble parche

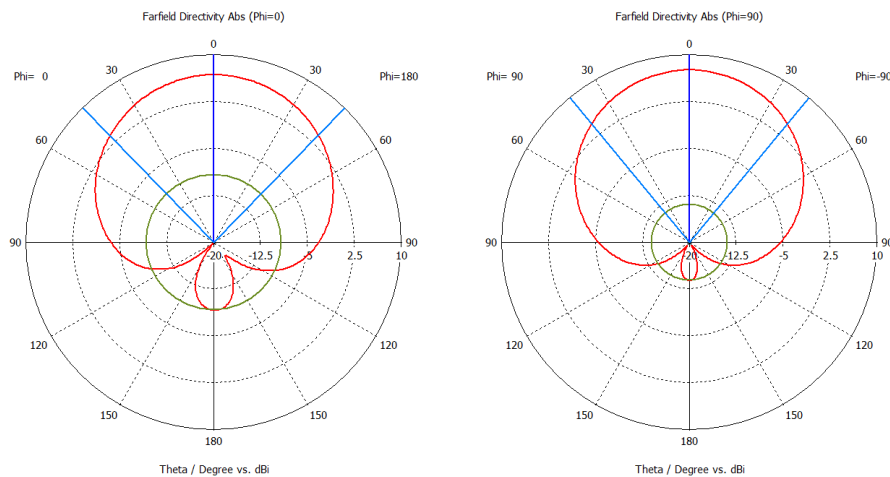
4.3. DIAGRAMA DE RADIACIÓN

En esta sección se muestran los diagramas de radiación en polares ($\phi = 0^\circ$ y $\phi = 90^\circ$) de ambos parches. Las gráficas de la Tabla 4.1 corresponden a la antena el con sustrato de permitividad 2,2 y las gráficas de la Tabla 4.2, a la misma estructura de antena con el sustrato de permitividad 3,38.



(a) $\phi = 0^\circ$ en coordenadas polares (b) $\phi = 90^\circ$ en coordenadas polares

Tabla 4.1: Doble parche, sustrato 1: Diagramas de radiación en coordenadas polares



(a) $\phi = 0^\circ$ en coordenadas polares (b) $\phi = 90^\circ$ en coordenadas polares

Tabla 4.2: Doble parche, sustrato 3: Diagramas de radiación en coordenadas polares

4.4. CONCLUSIONES

A partir de las gráficas anteriores se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Las respuestas en frecuencia son similares a aquellas de las Figuras 2.19 y 2.22, que corresponden a las mismas antenas, pero con un único parche microstrip, situado en la cara radiante de ésta. Se observa que en este caso la frecuencia de resonancia se ha desplazado ligeramente con respecto a dichas gráficas.
- Comparando ambas gráficas de la sección 4.2 se puede deducir que la respuesta en frecuencia en cuanto a anchura de banda varía poco con la permitividad del sustrato del que se fabrique la antena. La frecuencia de resonancia es en ambos casos algo menor a los 5 GHz y en el resto de frecuencias no existe radiación. No obstante, se observa que el ancho de banda a -10 dB es ligeramente mayor en el sustrato de menor permitividad.

Capítulo 5

FABRICADO DEL PARCHE

Este último capítulo presenta el resultado de la fabricación de una antena de parche reconfigurable en frecuencia, cuyo sustrato corresponde con el tercero de la Tabla 2.1, y que tiene un espesor de 0,5 mm y una permitividad relativa $\epsilon_r = 3,38$.

5.1. PLANTEAMIENTO

Se han presentado diferentes prototipos para su posterior fabricación. En las simulaciones en la sección 3.2 se ha considerado que toda la antena (todos sus componentes) cambian de la misma forma que el elastómero, es decir, se expanden en área la misma cantidad. Esta es una situación totalmente ideal, y para el proceso de fabricación han debido de hacerse algunos cambios.

Inicialmente se ha dividido la antena en dos partes:

- La parte *inferior* constará de un plano de masa, una primera lámina del sustrato escogido y la línea microstrip (para alimentar el parche mediante acoplo electromagnético).
- La parte *superior*, por otro lado, contendrá una segunda lámina del mismo sustrato y el parche microstrip.

En las Tablas 5.1 y 5.2 se han recogido todos los datos necesarios para la fabricación (las dimensiones son aproximadas, ya que existe cierto margen de error).

PARTE INFERIOR (fija)		
Componente	Material	Dimensiones
<i>Plano de masa</i>	PEC	Espesor: 1,3 mm
<i>Sustrato inferior</i>	25N de $\epsilon_r = 3,38$	Espesor: 0,787 mm
<i>Línea microstrip</i>	PEC	Anchura: 1,1674 mm Longitud: 19,5 mm

Tabla 5.1: Fabricado: datos parte inferior

PARTE SUPERIOR (variable)		
Componente	Material	Dimensiones
<i>Sustrato superior</i>	25N de $\epsilon_r = 3,38$	Espesor: 0,5 mm
<i>Parche microstrip</i>	Cobre	Espesor: 5 μm

Tabla 5.2: Fabricado: datos parte superior

El sustrato dieléctrico (de ambas partes, tanto superior como inferior) corresponde al material 25N de permitividad $\epsilon_r = 3,38$. Si se hubiera decidido fabricar el parche con el otro sustrato disponible, sería el *Duroid 5880* de permitividad $\epsilon_r = 2,2$. Las hojas de características de ambos sustratos son las siguientes:

- *Duroid 5880*:

<http://www.rogerscorp.com/documents/606/acs/RT-duroid-5870-5880-Data-Sheet.pdf>.

- 25N:

<http://imageserv10.team-logic.com/mediaLibrary/303/25N25FR.pdf>.

La lámina elastómera corresponde al producto 12-5-4910 del distribuidor 3M (<http://www.digikey.com>) y se muestra en la Figura 5.1. En el momento de la fabricación no se encuentra disponible, de modo que no se ha insertado en el prototipo creado. Para emular su presencia, se han fabricado parches de diferentes tamaños, como si el cambio de dimensiones fuera provocado por dicho material.



Figura 5.1: Foto del elastómero

5.2. MODELOS FABRICADOS

En primer lugar, se ha fabricado una única parte inferior, que corresponde con la Figura 5.2 en donde se ve la posición del conector coaxial SMA y la línea microstrip para la alimentación del parche mediante acoplo electromagnético. Los agujeros en cada esquina servirán para sujetar la antena con tornillos de plástico.

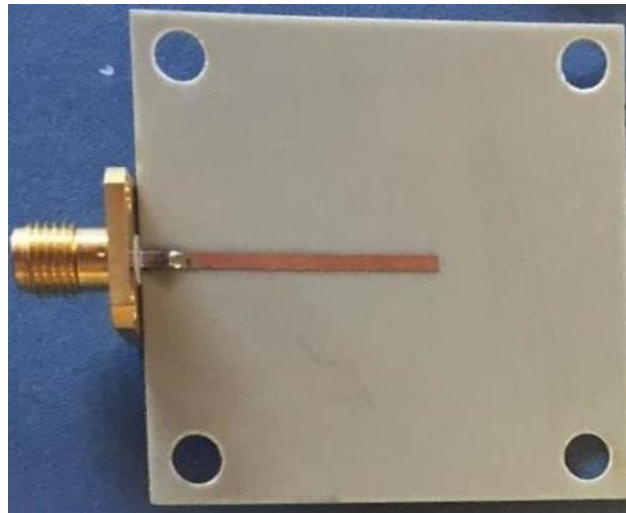
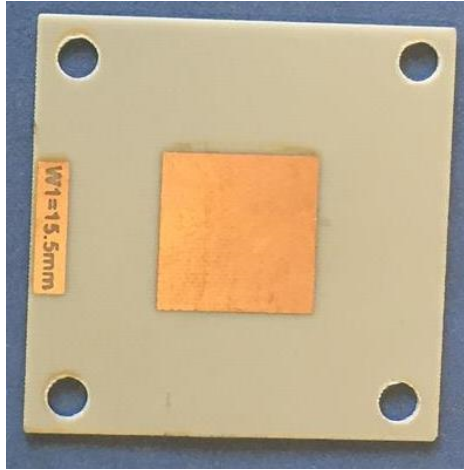


Figura 5.2: Fabricado de la antena: parte inferior

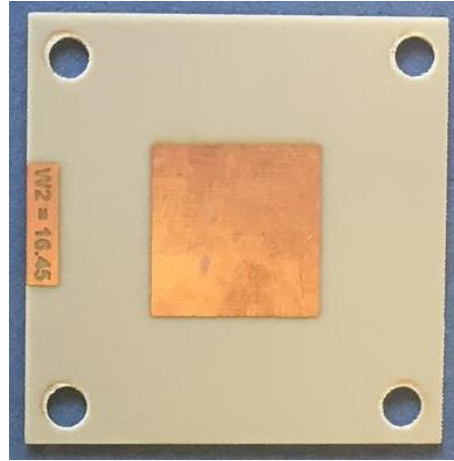
Se han fabricado cinco partes superiores, que corresponden con las dimensiones recogidas en la Tabla 5.3. Estos cinco prototipos poseen las mismas dimensiones exteriores, $41 \times 41 \text{ mm}$, igual que la parte inferior, con el fin de hacerlas coincidir a la hora de juntarlas y así fijarlas con los tornillos como se mencionó anteriormente.

Figura	5.4(a)	5.4(b)	5.4(c)	5.4(d)	5.4(e)
W (tamaño del parche en mm)	15,5	16,45	17,55	18,93	20,7
Dimensiones exteriores (en mm)	41 \times 41				

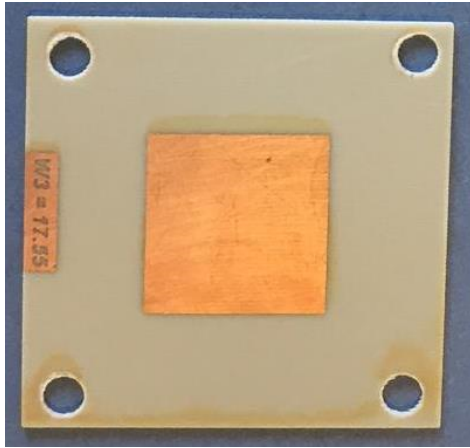
Tabla 5.3: Medidas de fabricado de las partes superiores del parche



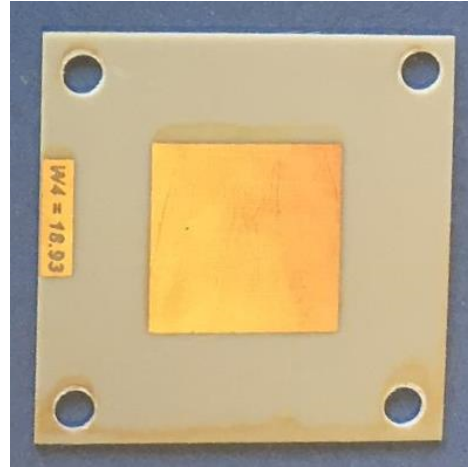
(a) Parche $W_1 = 15,5 \text{ mm}$



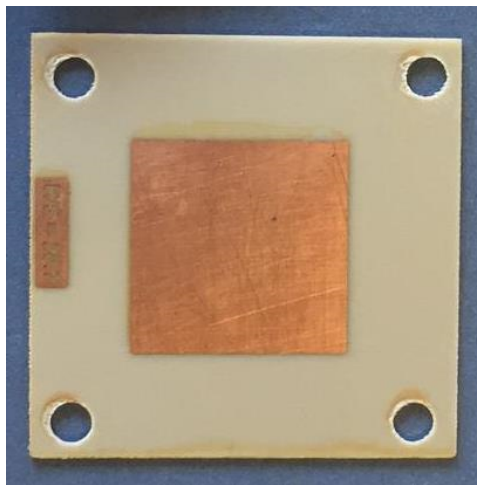
(b) Parche $W_2 = 16,45 \text{ mm}$



(c) Parche $W_3 = 17,55 \text{ mm}$



(d) Parche $W_4 = 18,93 \text{ mm}$



(e) Parche $W_5 = 20,7 \text{ mm}$

Tabla 5.4: Fabricado: las 5 partes superiores

5.3. MEDIDAS EXPERIMENTALES

A la hora de realizar las medidas, hay que superponer la parte inferior (mostrada en la Figura 5.2) con cada una de las cinco partes superiores, en tal modo que la línea microstrip alimente cada parche mediante acoplo electromagnético.

Las medidas se han hecho en el laboratorio con el *analizador de redes*, (Figura 5.3) instrumento capaz de medir la impedancia y los parámetros S de una red de microondas. En nuestro caso, se ha medido el parámetro S_{11} (coeficiente de reflexión a la entrada) para cada una de las cinco antenas.

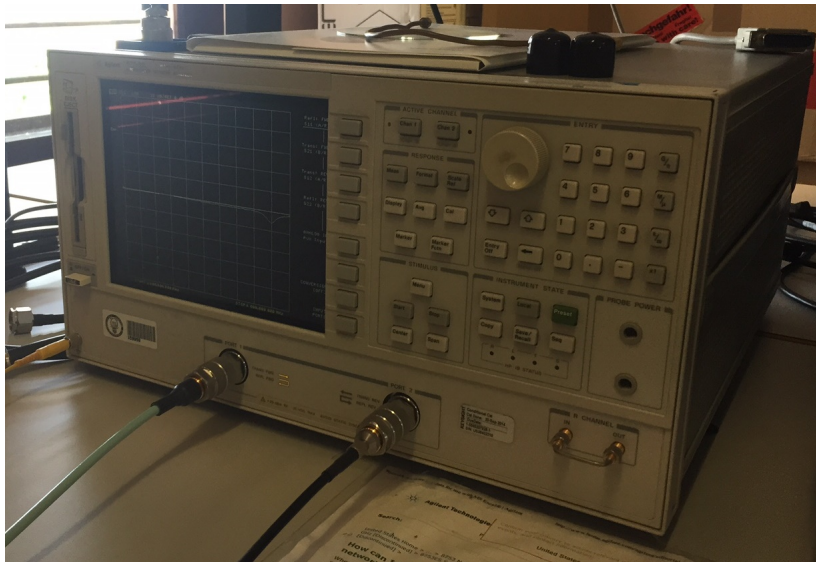


Figura 5.3: Fabricado: Analizador de redes para medición del parámetro S_{11}

Lamentablemente, en el momento de las medidas no se ha tenido acceso a la cámara anecoica, encargada de medir el diagrama de radiación, de modo que en este caso no se ha podido contrastar el resultado simulado en los anteriores capítulos con un resultado real.

La respuesta en frecuencia de las antenas de parche fabricadas se muestran en la Figura 5.4. El analizador de redes utilizado no permite medir frecuencias mayores a los 6 GHz , es por ello que el resultado correspondiente a la antena de parche de W_1 no se visualiza en la gráfica.

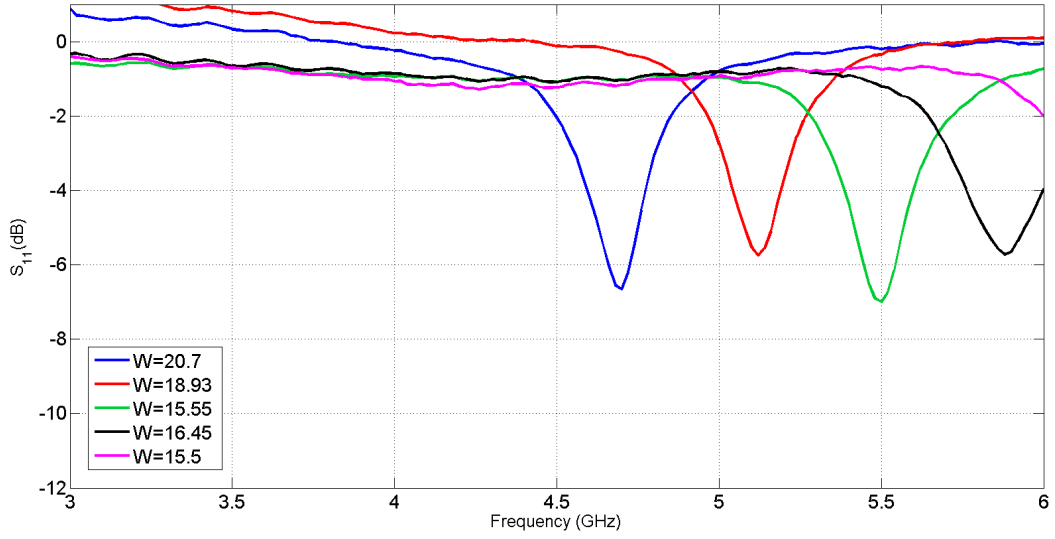


Figura 5.4: Fabricado: Respuesta en frecuencia S_{11} para los prototipos fabricados

5.4. CONCLUSIONES

A partir de las gráficas obtenidas, y contrastando con los resultados simulados en los capítulos anteriores, se observa que:

- La antena funciona correctamente, es decir, a medida que aumenta el tamaño del parche, la frecuencia de resonancia disminuye.
- Sin embargo, el prototipo fabricado funciona a frecuencias más altas que en las simulaciones. Esto puede ser debido a tolerancias de fabricación o la indeterminación de la permitividad del sustrato que da el fabricante. Dado que se han usado dos capas, instaladas de manera independiente, al unir las con los tornillos existe la posibilidad de que se haya creado un gap de aire, provocando que la permitividad global sea menor a la que consideramos inicialmente. Como consecuencia, la frecuencia de resonancia es mayor a la obtenida teóricamente.
- La adaptación en todos los casos es algo peor que en las simulaciones, aunque se mantiene en el mismo nivel en todas las frecuencias (lo cual es positivo, ya que demuestra linealidad). Esto puede ser igualmente debido al gap de aire creado entre ambas capas del sustrato.

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1. CONCLUSIONES

A lo largo de este TFG se ha evaluado la viabilidad de realización de una antena de parche reconfigurable en frecuencia a base del uso de un material elastómero, que tiene la propiedad de cambiar sus dimensiones en función del voltaje que se le aplica.

Para ello, inicialmente se han diseñado diferentes antenas de parche considerando los distintos sustratos dieléctricos de que se disponá en el laboratorio y teniendo en cuenta que necesariamente la antena tendría que ir alimentada por acoplo capacitivo, es decir, que estaría formada por dos capas de dieléctrico. Estas antenas han sido analizadas a partir de sus respuestas en frecuencia y diagramas de radiación.

De las simulaciones iniciales, se ha llegado a la conclusión de que el sustrato número 1 (Tabla 2.1) es, de entre los cuatro presentados, el que mejor respuesta en frecuencia y radiación proporciona. Se han analizado tanto las gráficas del coeficiente de reflexión (o parámetro de Scatering S_{11}) como su directividad y radiaciones en direcciones no deseadas.

El sustrato número 3 (Tabla 2.1) posee una respuesta en frecuencia similar, y considerando que la permitividad es mayor, las dimensiones de un parche con este sustrato serían menores al anterior. No obstante, la eficiencia y el ancho de banda en este caso, son ligeramente menores.

Los resultados obtenidos para las antenas con sustratos de espesores más gruesos son de poco interés, debido fundamentalmente al grosor de la línea microstrip que alimenta el parche, aunque el comportamiento en frecuencia sea bueno.

Una vez escogidos los dos sustratos que mejor soluciones consiguen, se ha hecho un pequeño estudio en el modo en que la lámina elastómera deformaría el tamaño del parche, modificando su frecuencia de resonancia. La variabilidad en frecuencia es similar para las dos antenas analizadas, alcanzando el 24 % para una compresión de la lámina elastómera del 30 %, quedando demostrado de este modo la viabilidad de realización de una antena reconfigurable en frecuencia utilizando un material de este tipo.

Dado que el sustrato elastómero causa una deformación también en los metales con los que está en contacto, se ha efectuado una simulación más realista que consiste en una antena con dos parches. Los resultados obtenidos no presentan grandes variaciones con respecto a la antena de un único parche.

El último capítulo, encargado de la fabricación de algunos prototipos, ha mostrado el planteamiento llevado a cabo y una serie de resultados experimentales a partir de las antenas creadas. A pesar de haber demostrado que el sustrato número **1** (Tabla **2.1**) proporciona mejores resultados que los demás, para la fabricación se ha escogido el sustrato **3**. Las dimensiones de la antena en este caso son mayores y por tanto es más fácil de construir y manejar en el laboratorio, y de igual modo, la adaptación en frecuencia, el ancho de banda y las características de radiación son bastante buenas.

Los resultados experimentales muestran que la antena funciona correctamente, ya que a medida que el parche aumenta de tamaño, su frecuencia disminuye. No obstante se ha observado que la frecuencia de los prototipos fabricados es mayor a la obtenida en simulación, debido principalmente a un cambio en la permitividad global del parche, provocado por la creación de un gap de aire entre ambas capas de sustrato al unir ambas partes, superior e inferior.

6.2. LÍNEAS FUTURAS

A continuación se proponen las principales líneas de investigación que quedan abiertas tras la realización de este TFG:

- La fabricación del prototipo completo es la principal línea futura que se presenta. Dado que los modelos analizados en este TFG son numerosos y variados, las opciones de fabricación son múltiples. Si se deseara evaluar experimentalmente la variabilidad de la frecuencia, sería necesario insertar la lámina elastómera (ya que no ha sido posible en nuestro caso). Estirando esta lámina a base de cambiar la tensión o diferencia de potencial aplicada, será posible modificar el tamaño del parche y por tanto la frecuencia de resonancia de la antena. Habría por tanto que encontrar el modo de realizar las metalizaciones (el parche) sobre el elastómero.
- De carácter adicional a la fabricación presentada en este TFG, se sugiere una fabricación más perfeccionada, es decir, realizar ciertos retoques en el diseño presentado en este documento, con la principal finalidad de conseguir mayor adaptación en las frecuencias de trabajo de cada antena.
- Por último, otra posible línea sería aplicar estos mismos principios de materiales elastómeros a otras configuraciones de antenas más complejas o circuitos que pudieran hacerse reconfigurables a base de cambiar sus dimensiones con la ayuda de estos materiales. Por ejemplo, podrían construir estructuras filtrantes de tipo Frequency Selective Surface (FSS) reconfigurables en frecuencia.

SUMMARY

PATCH ANTENNAS

An antenna is a transducer, which transmits and receives Electromagnetic (EM) waves. Unlike other antennas, patch antennas have several advantages that make them better in many applications.

A keyword in this Thesis is, undoubtedly, “*patch antenna*”. They are also called microstrip antennas and consist of a rectangular (or circular) patch of metal situated onto a ground plane. Layers of substrate can be added in the structure in order to obtain different results. These antennas have typically a radiation in the broadside direction, although they can also radiate in other directions if needed.

Different techniques are available to feed patch antennas, such as *microstrip line* feeding, *coaxial probe* feeding, *aperture coupled* feeding or *proximity coupled* feeding.

- Both microstrip line and coaxial probe methods let the Radio Frequency (RF) power to be introduced into the system by a connecting element (microstrip line or coaxial probe). They are known as *contacting methods*.
- *Non-contacting methods* let the power to be transferred from the microstrip line to the patch through an effect known as coupling. (i.e. aperture or proximity coupled feeding).

In this document proximity coupled feeding method has been selected. In this way, two substrate layers have been included, so the microstrip line is sandwiched by them. Both layers have been set with the same substrate (at least same dielectric permittivity). This technique gives a higher bandwidth and it is easier to model, but at the same time is quite difficult to manufacture, because of the precise alignment of the substrates.

ANTENNA DESIGN

In this section the complete antenna design and several simulations are shown. First of all, it should be taken into consideration the four available substrates, since they will perform different frequency behaviours and final conclusions will depend directly on them. See Table 2.1 for details.

Tables 2.2 and 2.3 show values of parameters in order to perform the antenna creation in CST Studio Suite and Figures 2.2 and 2.3 illustrate the result of this performance.

In the first place, patch antenna will include a *discrete port*, which is simpler than *waveguide port* and the obtained resonance frequency is based on it. Nevertheless, this will just be an intermediate step. All final simulations will include a waveguide port. For antenna manufacturing, an SMA coaxial connector is needed.

This way, the patch antenna consists of (from bottom to top):

- Ground plane
- First substrate layer
- Microstrip line
- Second substrate layer
- Dielectric elastomer (discussed later)
- Rectangular patch

A **dielectric elastomer** is a soft active material which consists of a thick membrane sandwiched by two electrodes [7], and in our case the electrodes will be the patch antenna. They are, substantially, transducers, and when a voltage is applied between both electrodes a strain is caused. This material is characterized for its light weight, low cost, fast response and no noise.

The principle of operation of dielectric elastomers is shown in Figure 1.11. Along this document it will be considered that elastomer keeps its net volume, so that as it compresses in thickness, it expands in area, following the prism volume formula $V_{tot} = A_b \cdot h$, where h is the elastomer thickness and $A_b = W \times W$, since it is a rectangular patch.

In this Bachelor Thesis, an elastomer is incorporated to the antenna, so that it would be in contact with the rectangular patch on the radiating face. The patch will be one of the electrodes, so that every change in elastomer dimensions will affect to patch's as well, and therefore there will be a frequency variation.

Taking into consideration the four substrates on Table 2.1 and simulations results of Figure 2.26, it can be said that:

- Substrates number **1** and **3** give a good frequency response and they are good candidates for antenna manufacturing. The bandwidth obtained is narrow (as expected) and right antenna matching has been achieved in both cases.
- Substrate number **2** does not give as suitable results as previous materials. It is too thick and the microstrip line situated between both substrate layers becomes wider than average because of that. Dielectric thickness is 3,175 *mm* which is a handicap for microstrip line calculation.
- Despite the frequency response of the antenna with substrate **4** is pretty good, the microstrip line that must be included in the system turns to be too thick, as in substrate 2. This fact is also due to the thickness of this substrate (1,5 *mm*).

Radiation patterns for each substrate are shown as well, displaying the results just mentioned. Substrates **1** and **3** give positive results and their patterns have a good directivity, while substrates **2** and **4** make the antenna radiate in a less directive way.

ANTENNA RESHAPE AND FREQUENCY VARIABILITY

Since the real purpose in this Bachelor Thesis is the frequency variability of stretchable patch antennas, several simulations for this target are shown in Chapter 3. Five different antennas have been created for each substrate (**1** and **3**) in CST Studio Suite and simulation results are shown in Figures 3.1 and 3.2.

From Table 3.2 we observe that simulations have been performed according to maximum and minimum elastomer thicknesses of 0,091 *mm* and 0,051 *mm*, respectively, in increments of 0,010 *mm*.

Frequency varies from 5 GHz (first and default simulation) to 3,8 GHz (last one). It means that the frequency variability is about 25 %, at the same time that thickness's is 30 %.

Patch dimensions get bigger as frequency reduces, reaching maximum size of $W = 25\text{ mm}$ in case of substrate **1**, and $W = 20,70\text{ mm}$ in case of substrate **3**. For this maximum dimensions of the patch, (in both cases) a new resonance frequency appears around 7,4 GHz . In addition, a perfect antenna matching is achieved in every case, and bandwidth does not vary too much from one frequency to another.

ANTENNA MANUFACTURING

Double patch antenna

In previous simulations we have considered just one rectangular patch, situated on the radiation face of the antenna. As said before, the elastomer would change its thickness because of the charges that flow from one electrode to another. Electrodes functions will be performed by the microstrip patches, and since it is a more realistic solution, a second patch needs to be added to the system.

For this purpose, a double-patch antenna simulation is presented, and Figure 4.1 illustrates the arrangement of its components. We have considered both substrate **1** and **3** in order to choose the one that provides the best frequency response.

Figures 4.2 and 4.3 show that there are not big differences between them, but bandwidth in first substrate is a little bit wider than in second one.

Manufacturing

We could have selected substrate number 1, since frequency response provides a wider bandwidth, patch size is smaller and consequently, this antenna would have had a bigger gain. Instead, substrate number 3 has been chosen for the antenna manufacturing, with dielectric permittivity of 3,38 and a thickness of 0,5 mm . In spite of having a slightly narrower bandwidth, the antenna will be bigger and this fact will make it more manageable.

Model to manufacture has been structured in two bricks:

- *Lower brick*: ground plane, first layer of substrate **3** and microstrip line.
- *Upper brick*: second layer of substrate **3** and microstrip patch.

Elastomer material (Figure 5.1) has not been included in antenna manufacturing due of time constraints and instead, we have suggested an alternative solution: just *one* lower brick and *five* different upper bricks, in order to “emulate” the effect of the elastomer. Lower brick is illustrated in Figure 5.2 and upper bricks in Figures 5.4(a) to 5.4(e) (increasing patch size).

With this approach, lower brick will be joined with each upper brick, in order to get a frequency response with the network analyzer. Only frequencies under 6 *GHz* can be displayed in this tool, and this is because we did not obtained results of the first antenna. S_{11} frequency response is shown in Figure 5.4, where we can conclude that the antenna works normally, decreasing its resonance frequency at the same time it increases in size.

The resonance frequency of real prototypes are bigger and antenna matching at this frequencies is worse than in simulated models. It is due to manufacturing tolerances and substrate permittivity indeterminacy. Since we have designed a two bricks model, each one having a substrate layer, an air gap may be created between both layers, causing a lower global permittivity than considered, and in consequence, a higher frequency.

We suggest as a future line a real prototype manufacturing, considering also the elastomer. In this case, elastomer should be stretched for a change in patches size. Evenly, we propose an improvement in patch design, in order to get a better matching.

Bibliografía

- [1] *CONSTANTINE A. BALANIS*. Microstrip Antennas.
Antenna Theory: Analysis and Design. John Wiley and Sons, Inc., 2005, Chapter 14.
- [2] Página web: <http://www.antenna-theory.com>
- [3] *TORRES AGUILERA, EDUARDO*. Optimización y Diseño de Antenas de Parche.
Universidad Carlos III de Madrid. *Proyecto de Fin de Carrera*, 2010.
- [4] Página web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Actuador>
- [5] *SEIKI CHIBA, MICKIO WAKI*. Extending Applications of Dielectric Elastomer Artificial Muscles to Wireless Communication Systems.
Recent Advances in Wireless Communications and Networks, INTECH Open, August 2011, Chapter 20.
- [6] *S. JALALI MAZLOUMAN, M. SOLEIMANI, A. MAHANFAR, R.G. VAUGHAN*.
Pattern reconfigurable square ring patch antenna actuated by hemispherical dielectric elastomer, Electronics Letters, 3rd February 2001, Vol. 47, No. 3.
- [7] *ZHIGANG SUO*. Theory of Dielectric Elastomers.
Acta Mechanica Solida Sinica, 30th November 2010, Vol. 23, No. 6
- [8] *X-J JIANG, S. JALALI MAZLOUMAN, A. MAHANFAR, R.G. VAUGHAN, C. MENON*.
DEA deformed stretchable patch antenna. Smart Materials and Structures, 1st March 2012, Vol. 25, No. 5
- [9] *CST - COMPUTER SIMULATION TECHNOLOGY*
Página web: <https://www.cst.com/>

[10] *CST Tutorial: Design of microstrip antenna.*

Página web: <http://appliedelectronicsengineering.blogspot.com.es/2013/08/design-of-microstrip-antenna-in-cst.html>

[11] *CST Tutorial: Patch antenna using CST.*

Página web: <https://www.youtube.com/watch?v=lsxl9ryj2dc>

[12] *CST Tutorial: Port Creation and Simulation for a Microstrip Patch Antenna.*

Página web: <https://www.youtube.com/watch?v=k54XWrcI5Bc>

[13] *UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones.*

Página web: <http://www.itu.int/es/about/Pages/default.aspx>

Apéndice

A. CST Studio Suite

CST STUDIO SUITE es un software de simulación de diseños electromagnéticos, compuesto de herramientas para la creación y la optimización de dispositivos que operan en un amplio rango de frecuencias. Los análisis también incluyen efectos térmicos y mecánicos, además de simulación de circuitos.

CST STUDIO SUITE está compuesto de diversos módulos, mostrados en la Tabla 1, de los cuales el empleado en este TFG es el primero de todos, *CST Microwave Studio (CST MWS)*. Esta herramienta proporciona una simulación más precisa en 3D de dispositivos de alta frecuencia, y lleva a cabo también simulaciones de dispositivos en el dominio del tiempo. Permite el análisis de antenas, filtros, acopladores, estructuras planas y multi-capa, incluso de efectos de compatibilidad electromagnética.

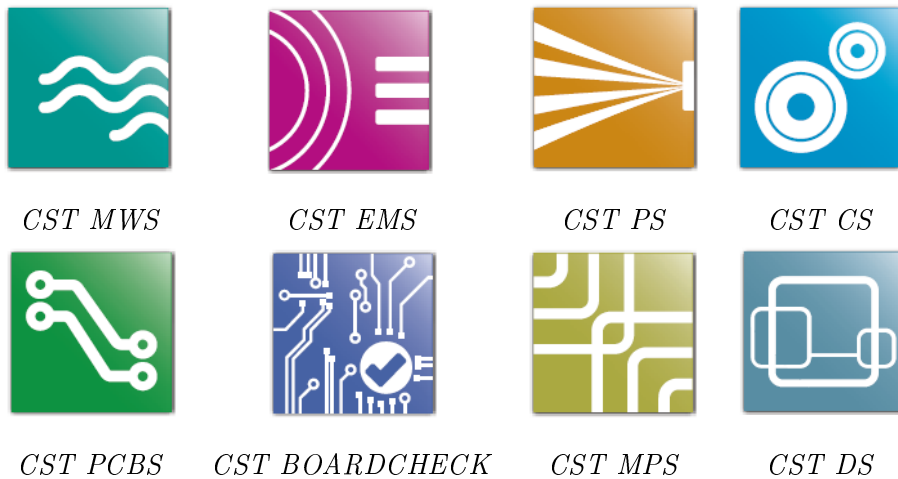


Tabla 1: Apéndice A: Diferentes módulos de la herramienta *CST Studio Suite*

La interfaz de usuario de CST MWS permite seleccionar el módulo de simulación que más se adecúe al sistema a simular y puede ser uno de los siguientes:

- Transient Solver, o régimen transitorio.
- Frequency Domain Solver, o en frecuencia.
- Eigenmode Solver, o en modo propio.
- Resonant Solver, o modo resonante.
- Asymptotic Solver, o modo asintótico.

De todos ellos, el usado en este TFG es la simulación en el dominio del tiempo, o *Transient Solver* que ofrece simulaciones de propagación de campos electromagnéticos bajo el dominio temporal.

Dentro del modo de simulación *Transient Solver*, a lo largo de todas las simulaciones contenidas en este documento, se ha recurrido a la inserción de dos tipos de puerto: *discreto* y de *guía de onda*. El primero de ellos ha sido de carácter orientativo, pues todas las simulaciones han estado orientadas a una futura fabricación de la antena y por ello ha sido necesario cambiar este puerto a uno de guía de onda.

B. Presupuesto

En el presente anexo se presenta la planificación llevada a cabo en este TFG (considerando todas las fases de su elaboración) así como una valoración económica del mismo.

La Tabla 2 muestra el cómputo de horas aproximado en cada una de las tareas que han formado parte de la elaboración de este TFG.

Tarea	<i>Horas (aprox.)</i>
<i>Planificación inicial del Trabajo</i>	15
<i>Lecturas iniciales (estado del arte)</i>	25
<i>Primera toma de contacto con CST Studio Suite</i>	15
<i>Simulaciones: diseño inicial</i>	25
<i>Simulaciones: deformado del parche</i>	10
<i>Generación de gráficas e imágenes</i>	10
<i>Fabricado del parche y toma de datos experimentales</i>	40
<i>Redacción de la memoria</i>	175

Tabla 2: Apéndice B: Desglose en horas del TFG

La suma total asciende a **315** horas. A su vez se ha hecho un desglose del coste por hora, así como el coste de material, completando el presupuesto total:

- La autora de este TFG se encuentra en la situación de becaria, de modo que se considera un precio medio por hora de 5,5 €.
- Cada hora empleada por la tutora está valorada en 25 €.
- El coste de material considerado es únicamente el ordenador con el que se han realizado las simulaciones y el presente documento, cuyo importe es de 750 €.
- El coste de material correspondiente a la fabricación de las antenas (material elastómero, sustratos, metalizaciones...) es de 350 €.

Con estos datos, el presupuesto total asciende a:

Tarea	<i>Horas</i>	<i>€/hora</i>	<i>Importe (€)</i>
<i>Tiempo dedicado por la autora</i>	315	5,5	1733
<i>Tiempo dedicado por la tutora</i>	25	25	625
<i>Coste material</i>	-	-	750
<i>Coste fabricado parche</i>	-	-	350

TOTAL: 3733 €

Tabla 3: Apéndice B: Presupuesto total del TFG

C. Bandas de frecuencia

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) [13] es el organismo especializado de las Naciones Unidas para las tecnologías de la información y la comunicación. Se atribuye el espectro radioeléctrico y las órbitas de satélite a escala mundial, y se elaboran normas técnicas que garantizan la interconexión continua de las redes y las tecnologías.

Las Bandas UIT están recogidas en las *Regulaciones de Radio en el Artículo 2, provisión N^o 2.1*, donde se especifica que el espectro radioeléctrico está dividido en un total de 9 bandas de frecuencias, donde cada banda está identificada con un número entero.

El número de banda corresponde con el logaritmo decimal de la media geométrica de los límites (inferior y superior) expresados en hercios. Como ejemplo, la media geométrica aproximada de la banda número 7, es 10 MHz (o 10^7 Hz).

La Tabla 4 recoge las bandas de frecuencia establecidas por la UIT.

Banda	Símbolo	Rango de frecuencias
4	VLF	3 a 30 kHz
5	LF	30 a 300 kHz
6	MF	300 a 3000 kHz
7	HF	3 a 30 MHz
8	VHF	30 a 300 MHz
9	UHF	300 a 3000 MHz
10	SHF	3 a 30 GHz
11	EHF	30 a 300 GHz

Tabla 4: Apéndice C: Bandas de radiofrecuencias UIT

Así, dado que los planteamientos, simulaciones y fabricación de las antenas de parche de este TFG han estado centradas en una frecuencia de 5 GHz , corresponden con la Banda **S**, o Super High Frequency (SHF).